

Verena Luisa Aufderheide

Nachhaltige Produktivität von Smart-Circular Product-Service-Ecosystems am Beispiel von Photovoltaikanlagen

**Arbeitsbericht Nr. 17
Juli 2023**

ABSTRACT

Nachhaltige Produktivität von Smart-Circular Product-Service-Ecosystems am Beispiel von Photovoltaikanlagen

Photovoltaikanlagen sind ein wichtiges Element zur Umsetzung der Energiewende. Ihre Nachhaltigkeit lässt sich erhöhen, indem die Anlagen nach der Nutzungsphase aufbereitet und im Kreislauf geführt werden. Dies kann in einem Netzwerk von spezialisierten Anbietern erfolgen. Der Beitrag befasst sich mit der Entwicklung eines ganzheitlichen Nachhaltigkeitsindex, um die Nachhaltigkeitsbewertung transparenter und vergleichbarer zu machen. Es wird gezeigt, welche Auswirkungen die Erweiterung um die Circular Economy und Netzwerkstrukturen auf den Index haben. Der ganzheitliche Nachhaltigkeitsindex wird für das Beispiel der Photovoltaikanlagen angewendet.

Keywords: Photovoltaik, Nachhaltigkeit, Ecosystems, Product-Service-Systems

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	1
2. Photovoltaikanlagen im Netzwerk	3
2.1 Herausforderungen für Kunden von Photovoltaikanlagen	3
2.2 Smart-Circular Product-Service-Ecosystems	4
2.3 Überwindung der Herausforderungen durch das Anbieternetzwerk	7
3. Bewertung der Effektivität einer nachhaltigen Produktion.....	8
3.1 Ökologische Produktivität	8
3.2 Overall Equipment Effectiveness	10
4. Nachhaltige Produktivität	12
4.1 Grundgerüst der nachhaltigen Produktivität	12
4.2 Normierung der Werte.....	13
4.3 Gewichtung der Dimensionen	14
4.4 Auswirkungen zirkulärer Zielsetzungen auf den nachhaltigen Produktivitätsindex	15
4.4.1 Wiederverwendung von SCPSS	17
4.4.2 Wiederverwertung von SCPSS.....	18
4.4.3 Weiterverwendung und -verwertung von SCPSS	18
4.4.4 Recycling von SCPSS.....	18
4.5 Auswirkungen von Netzwerkstrukturen auf den nachhaltigen Produktivitätsindex	20
4.5.1 Auswirkungen auf den Output.....	20
4.5.2 Auswirkungen auf den Input	21
4.5.3 Auswirkungen auf die Umweltwirkungen	21
4.5.4 Auswirkungen auf die sozialen Wirkungen	21
4.6 Kennzahlenauswahl für den nachhaltigen Produktivitätsindex	22
4.6.1 Finanzielle Kennzahlen.....	22
4.6.2 Nicht-finanzielle Kennzahlen	22
5. Einsatz des nachhaltigen Produktivitätsindex zur Bewertung von Photovoltaikanlagen.....	30
5.1 Bewertung der ökonomischen Dimension	30
5.1.1 Output einer PV-Anlage	30
5.1.2 Input einer PV-Anlage	31
5.1.3 Produktivität einer PV-Anlage	32
5.2 Bewertung der ökologischen Dimension	32
5.2.1 Eingesetzte Umweltwirkung einer PV-Anlage	32
5.2.2 Erzeugte Umweltwirkung einer PV-Anlage	33

5.2.3 Umweltwirkung einer PV-Anlage	34
5.3 Bewertung der sozialen Dimension.....	34
5.4 Nachhaltiger Produktivitätsindex einer PV-Anlage.....	35
5.4.1 Ökonomische Dimension.....	35
5.4.2 Ökologische Dimension.....	36
5.4.3 Soziale Dimension	36
5.4.4 Nachhaltiger Produktivitätsindex für das Beispiel.....	37
6. Anwendungsbereiche des nachhaltigen Produktivitätsindex.....	39
7. Kritische Würdigung und Ausblick.....	41
LITERATURVERZEICHNIS.....	42

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Herausforderungen für Kunden beim Kauf einer PV-Anlage (in Anlehnung an Överholm, 2017; Ndzibah et al., 2022)	4
Abbildung 2: SCPSE für PV-Anlagen (in Anlehnung an Aufderheide et al., 2022)	6
Abbildung 3: Zusammensetzung der nachhaltigen Produktivität	13
Abbildung 4: Kreisläufe der Circular Economy	17

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Deskriptive Statistik zur Analyse der Nachhaltigkeitsberichte	24
Tabelle 2: Beispiel für die Klassifizierung von Kennzahlen für die ökologische Dimension	25
Tabelle 3: Beispiel für die Klassifizierung von Kennzahlen für die soziale Dimension	28
Tabelle 4: Zielbewertung ökologische Wirkung	36
Tabelle 5: Zielbewertung soziale Wirkung	37

SYMBOLVERZEICHNIS

BOL	Beginning-of-Life-Phase
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
EOL	End-of-Life-Phase
GPI	Green Productivity Index
kWp	Kilowattpeak
Max.	Maximierungsziel
Min.	Minimierungsziel
MOL	Middle-of-Life-Phase
NPI	Nachhaltiger Produktivitätsindex
OEE	Overall Equipment Effectiveness
PSS	Product-Service-Systems
PV	Photovoltaik
SCPSE	Smart-Circular Product-Service-Ecosystems
SCPSS	Smart-Circular Product-Service-Systems
UW	Umweltwirkung
α	Relativer Parameter der Komponente Produktivität
β	Relativer Parameter der Komponente Umweltwirkung
γ	Relativer Parameter der Komponente Soziale Wirkung
μ	Gewichtungsfaktor für den primären Input

1. Einleitung

Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) reduzieren den CO₂-Ausstoß bei der Stromversorgung und tragen somit entscheidend zur Energiewende bei (García-López et al., 2023). Dennoch sind bis zur flächendeckenden Verbreitung noch einige Herausforderungen zu überwinden. Diese sollten gerade vor dem Hintergrund der aktuellen Nachhaltigkeitsdebatte angegangen werden.

Product-Service-Systems (PSS) gelten als vielversprechendes Angebot, um den Nutzen von Produkten für Kunden zu steigern (Tukker / Tischner, 2006). Durch das Zusammenführen von Produkten und darauf abgestimmten Serviceleistungen entstehen komplexe Angebote. Insbesondere digitale Technologien verstärken den Nutzen für Kunden und helfen Unternehmen bei der Kreislaufführung von Produkten und Rohstoffen (Alcayaga et al., 2019). Die Zusammenführung der PSS mit digitalen Technologien und zirkulären Wertschöpfungsprozessen wird als **Smart-Circular Product-Service-Systems (SCPSS)** bezeichnet. Diese häufig individualisierten Angebote können jedoch nicht durch ein einziges Unternehmen ermöglicht werden. Vielmehr sind hierfür komplexe Anbieternetzwerke notwendig, in denen verschiedene Wertschöpfungspartner ihre Kernkompetenzen zusammenbringen. Diese werden auch als **Smart-Circular Product-Service-Ecosystems (SCPSE)** bezeichnet (Aufderheide et al., 2022).

SCPSE werden als nachhaltige Lösung einer Wertschöpfungskette für komplexe Angebote angesehen. Um diese Aussage zu prüfen, wird nachfolgend ein Index zur Bewertung der ganzheitlichen Nachhaltigkeit entwickelt und für zirkuläre Netzwerke angepasst. Die Bewertung wird anhand des Beispiels einer PV-Anlage durchgeführt. Der Arbeitsbericht ist wie folgt aufgebaut:

Im **zweiten Kapitel** wird das Erkenntnisobjekt herausgearbeitet. Es wird gezeigt, wie sich kundenindividuell konzipierte PV-Anlagen im Anbieternetzwerk als SCPSS anbieten lassen. Weiter wird darauf eingegangen, inwiefern das Netzwerk die Herausforderungen löst, denen ein Kunde beim Kauf einer PV-Anlage gegenübersteht.

Gegenstand des **dritten Kapitels** ist die Vorstellung der ökologischen Produktivität und der Overall Equipment Effectiveness als Ausgangspunkt für die Entwicklung eines Index

für die nachhaltige Produktivität, der darauf aufbauend im **vierten Kapitel** abgeleitet wird. Der nachhaltige Produktivitätsindex (NPI) berücksichtigt neben der ökonomischen auch die ökologische und die soziale Dimension der Nachhaltigkeit und gibt Auskunft darüber, in welcher Dimension es zu Effizienz- und Effektivitätsverlusten kommt. Es wird außerdem auf die Auswirkungen der Netzwerkstrukturen und zirkulären Zielsetzungen des SCPSS auf die Berechnung des Index und die Höhe des Indexwertes eingegangen.

Das **fünfte Kapitel** wendet den NPI für die Wertschöpfungskette einer PV-Anlage an. Dabei wird ausführlich auf die einzelnen Schritte der Bewertung eingegangen.

Im **sechsten Kapitel** werden weitere Anwendungsmöglichkeiten des NPI aufgezeigt. Der Beitrag schließt mit einem Fazit und Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf.

2. Photovoltaikanlagen im Netzwerk

Kunden stehen beim Kauf einer PV-Anlage vor einigen Herausforderungen. Diese werden nachfolgend zunächst vorgestellt und anschließend wird ein Lösungsvorschlag zu deren Überwindung erarbeitet. Hierzu wird ein Anbieternetzwerk analysiert und für PV-Anlagen aufgebaut. Abschließend wird kurz darauf eingegangen, wie dieses Anbieternetzwerk zur Überwindung der Herausforderungen beiträgt.

2.1 Herausforderungen für Kunden von Photovoltaikanlagen

Immer mehr Kunden fordern nachhaltigere Lösungen für ihre Probleme, die gleichzeitig einen hohen Individualisierungsgrad aufweisen müssen. PV-Anlagen dienen der nachhaltigen Stromerzeugung (García-López et al., 2023). Doch obwohl PV-Anlagen grundsätzlich den Anforderungen nach Individualisierung und Nachhaltigkeit gerecht werden, stehen Kunden bei dem Kauf von PV-Anlagen vor weiteren Herausforderungen, die sich über den kompletten Lebenszyklus der PV-Anlagen ziehen und deren Verbreitung beeinträchtigen (Överholm, 2017; Ndzibah et al., 2022). Abbildung 1 fasst die Herausforderungen zusammen:

- **Beginning-of-Life-Phase (BOL):** Auswahl von Informationen über die PV-Anlagen, hohe Investitionskosten, lange Lieferzeiten
- **Middle-of-Life-Phase (MOL):** mangelnde Kenntnisse während der Nutzungsphase über die Effizienz und Effektivität der Nutzung, über Wartungsarbeiten und Reparaturen und deren Notwendigkeit, sowie über die dabei entstehenden Kosten
- **End-of-Life-Phase (EOL):** mangelnde Kenntnisse über umweltgerechte Entsorgungsaktivitäten und Recyclingprozesse, die zur Unterbrechung der Kreislaufführung führen können

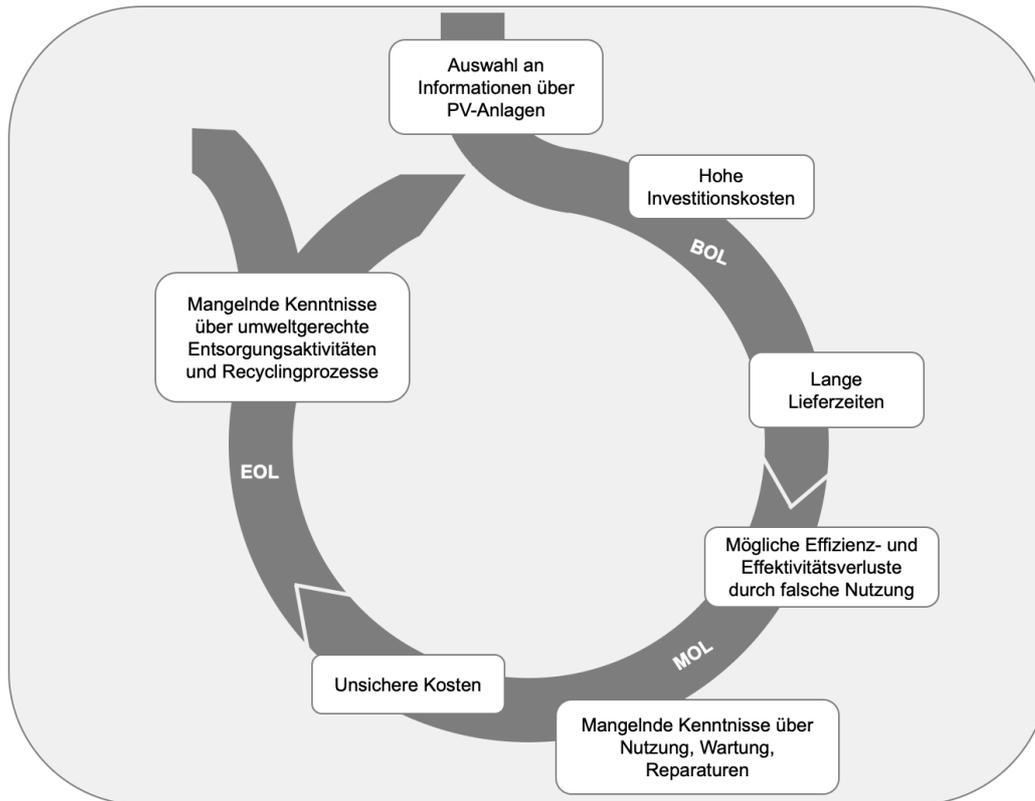


Abbildung 1: Herausforderungen für Kunden beim Kauf einer PV-Anlage (in Anlehnung an Överholm, 2017; Ndzibah et al., 2022)

2.2 Smart-Circular Product-Service-Ecosystems

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, eignet sich ein Anbieternetzwerk, welches die PV-Anlage nicht mehr verkauft, sondern ihre Nutzung vermarktet. Hierzu sind neben dem Anbieter der PV-Anlage eine Reihe von Wertschöpfungspartnern notwendig, die verschiedene Prozesse entlang des Lebenszyklus übernehmen (Aufderheide et al., 2022):

- **Beginning-of-Life-Phase:** Lieferanten, Produzenten und Handwerker für die Installation der PV-Anlage und den Anschluss an das Stromnetz
- **Middle-of-Life-Phase:** verschiedene Servicepartner und Handwerker für Wartungs- und Reparaturarbeiten der PV-Anlage
- **End-of-Life-Phase:** spezialisierte Entsorgungsunternehmen und Unternehmen zur Aufbereitung und Wiederverwendung der PV-Anlage bzw. ihrer Bauteile

Werden die Prozesse von den Wertschöpfungspartnern nicht nur hintereinander abgearbeitet, sondern finden weitere Interaktionen zwischen ihnen statt, kann ein Netzwerk aufgebaut

werden, welches als **Smart-Circular Product-Service-Ecosystems (SCPSE)** bezeichnet wird (Alcayaga et al., 2019). SCPSE zeichnen sich durch die folgenden Charakteristika aus:

- **Gemeinsame Schaffung von Werten:** Im Mittelpunkt von SCPSE steht ein gemeinsames Wertangebot, wie zum Beispiel die durchgehende Nutzung von PV-Anlagen. Um diesen Wert zu schaffen, arbeiten verschiedene Wertschöpfungspartner zusammen (Betz/Jung, 2021).
- **Definierte Rollentypen:** SCPSE umfassen eine definierte Reihe von Aktivitäten, die von bestimmten Wertschöpfungspartnern ausgeführt werden. Jede Aktivität wird dabei einem Wertschöpfungspartner zugeschrieben (Betz et al., 2019). Beispielsweise ist der Anbieter für die Kommunikation und Koordination im Netzwerk zuständig, der Produzent stellt die PV-Anlagen her und der Handwerker in der Beginning-of-Life-Phase installiert diese.
- **Kooperation und Wettbewerb:** Alle Wertschöpfungspartner arbeiten kooperativ, aber auch wettbewerbsorientiert zusammen, um das Wertversprechen der Befriedigung von Kundenbedürfnissen zu erreichen und letztendlich Innovationen zu schaffen (Jacobides et al., 2018). So stehen das Recycling- und das Aufbereitungsunternehmen in Konkurrenz zueinander, sind aber beide an einer langen Kreislaufführung der PV-Anlagen interessiert.
- **Komplementaritäten und Interdependenzen:** Auf der wirtschaftlichen Ebene sind die autonomen Wertschöpfungspartner des Netzwerkes durch Komplementaritäten und auf der strukturellen Ebene durch Interdependenzen gekennzeichnet (Betz/Jung, 2021).
- **Digitale Technologie-Infrastruktur:** Das gemeinsame Angebot wird durch digitale Technologien ermöglicht (Rezac, 2020).

Das SCPSE für PV-Anlagen ist in Abbildung 2 dargestellt.

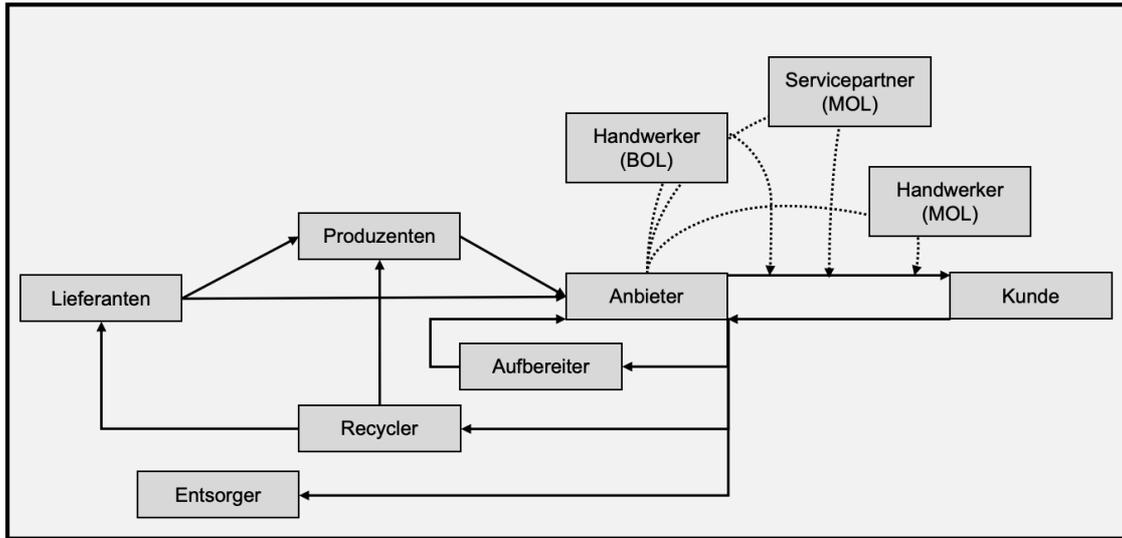


Abbildung 2: SCPSE für PV-Anlagen (in Anlehnung an Aufderheide et al., 2022)

Die Besonderheit bei SCPSE und dieser Art des Angebotes ist, dass der Verkauf der PV-Anlage in den Hintergrund rückt und der Kunde lediglich für die Nutzung bezahlt. In PV-Anlagen sind hochwertige Rohstoffe verbaut, die es im Kreislauf zu führen gilt, weshalb Recycling- und Aufbereitungsunternehmen am Ende des Lebenszyklus das Netzwerk unterstützen (Michellini et al., 2017). Um die Zirkularität zu fördern und weitere Vorteile zu erreichen, werden digitale Technologien eingesetzt, die das Angebot zu einem SCPSS erweitern (Alcayaga et al., 2017). Folgende Vorteile lassen sich dadurch realisieren:

- **Digitale Nachverfolgung:** Mithilfe verbauter Sensoren können Daten aufgezeichnet und die PV-Anlage als digitaler Zwilling beim Anbieter oder Stromversorger dargestellt und nachverfolgt werden (Chauhan et al., 2022; Mengata et al., 2022).
- **Digitale Kommunikation:** Das Internet der Dinge und digitale Plattformen ermöglichen einen Austausch in Echtzeit zwischen verschiedenen Wertschöpfungspartnern (Senyo et al., 2019).
- **Datensicherheit im Netzwerk:** Mittels Cybersecurity-Technologien werden Daten effizient vor dem Zugriff Dritter geschützt. Ein Beispiel ist die Blockchain, die die Daten in ein nicht manipulierbares Register überführt (Jarmakiewicz et al., 2017; Zhang et al., 2021).
- **Planungssicherheit:** Künstliche Intelligenz und Big Data Analytics unterstützen bei der Planung und automatisierten Beschaffung, sodass weder ein Engpass noch

eine Überproduktion entsteht (Friedemann / Schumann, 2010; Alcayaga / Hansen, 2022; Utama et al., 2023).

- **Beschleunigte Installation:** Durch Technologien wie kollaborative Roboter, Augmented Reality und Cyberphysische Systeme kann die Produktion und Installation der PV-Anlagen beschleunigt und verbessert werden (Jacob, 2019; Chauhan et al., 2022).
- **Digitale Wartung:** Maschinelles Lernen, künstliche Intelligenz und Predictive Maintenance ermöglichen eine digitale Wartung zum richtigen Zeitpunkt (Meyer et al., 2021; Patil et al., 2022; Utama et al., 2023).
- **Digitale Aufbereitung und Entsorgungswirtschaft:** Das Sensoring ermöglicht die Erfassung des Zustandes der PV-Anlage. Mithilfe des Internet der Dinge wird dieser Zustand in eine digitale Plattform eingepflegt. Über diese können die Daten weitergeleitet werden, sodass sekundäre Ressourcen effizient gesammelt werden können. Cyberphysische Systeme verringern die Umweltbelastungen in der Entsorgungswirtschaft (Ndzibah et al., 2022; Patil et al., 2022).

2.3 Überwindung der Herausforderungen durch das Anbieternetzwerk

Durch das Angebot der PV-Anlagen im SCPSE können die in Abschnitt 2.1 genannten Herausforderungen überwunden werden (Overholm, 2015):

- **Beginning-of-Life-Phase:** Der Anbieter übernimmt die individuelle Planung und Beratung. Die hohen Investitionskosten entfallen für den Kunden, da die Nutzung der PV-Anlage als Service und nicht die PV-Anlage verkauft wird. Durch eine bessere Planung im Netzwerk können die Lieferzeiten verkürzt werden.
- **Middle-of-Life-Phase:** Die Wartung und notwendige Reparaturen werden durch den Anbieter beauftragt und durch ausgebildete Handwerker durchgeführt. Eine Unterstützung durch digitale Technologien und Predictive Maintenance ist ebenfalls möglich. Gleichzeitig entfallen die hohen unsicheren Kosten für Kunden, die durch Reparaturen entstehen, da der Anbieter ein Nutzenversprechen gibt und somit für die Reparaturen und Wartungen verantwortlich ist.
- **End-of-Life-Phase:** Nach der Nutzungsphase wird die PV-Anlage sach- und umweltgerecht demontiert und durch verschiedene Unternehmen aufbereitet und recycelt.

3. Bewertung der Effektivität einer nachhaltigen Produktion

Unter Nachhaltigkeit versteht man die Berücksichtigung der drei Dimensionen Ökonomie, Ökologie und Soziales (Elkington, 1998). Die Bewertung der Nachhaltigkeit ist ein stetig diskutierter Forschungsbereich und es wurden zahlreiche Ansätze zur Bewertung entwickelt (Straube et al., 2009; Wütz, 2010; Ehlers et al., 2020). Herausforderungen liegen bei der Bewertung der Nachhaltigkeit insbesondere bei der quantitativen Messung und Bewertung weicher Faktoren, die überwiegend in der sozialen Dimension zu finden sind. Neben der Messbarkeit sind weitere Gütekriterien zu beachten, die die Bewertungsansätze erfüllen müssen, wie z.B. die Objektivität, Reliabilität und Validität (vgl. z.B. Neely et al., 1996; Neely et al., 1997; Steven, 2016).

Dieser Abschnitt stellt zunächst einen Index zur Bewertung der ökonomischen und ökologischen Nachhaltigkeit vor. Weiter wird eine Bewertung von Effektivitäts- und Effizienzverlusten im Anlagencontrolling vorgestellt.

3.1 Ökologische Produktivität

Die Produktivität ist eine wichtige ökonomische Kennzahl, die einen Einblick in die Güte der Transformation von Input zu Output gibt. Dazu wird der Output ins Verhältnis zum Input gesetzt, siehe Gleichung (1) (Mohanty / Deshmukh, 1999).

$$(1) \text{Produktivität} = \frac{\text{Output}}{\text{Input}}$$

Die Produktivität ist eine Kennzahl, die der ökonomischen Nachhaltigkeit zuzuordnen ist. Um heterogene Faktoren innerhalb der Produktivität miteinander verrechnen zu können und Kommensurabilität zu erreichen, ist eine Bewertung notwendig. Hierzu eignet sich die Bewertung mittels monetärer Größen. Für den Output sind die Erlöse und für den Input die Kosten heranzuziehen. Die Produktivität erfüllt die Gütekriterien der Bewertung, da alle Werte, die einzusetzen sind, quantitativ messbar und objektiv beurteilbar sind.

Ein Bewertungsansatz, der zwei Nachhaltigkeitsdimensionen bewertet, ist der **Green Productivity Index (GPI)** (Hur et al., 2004). Die Green Productivity, oder ökologische Produktivität, berücksichtigt nicht nur die Transformation von Input zu Output, sondern

betrachtet zusätzlich die beim Transformationsprozess entstehenden Umweltbelastungen. Der GPI setzt die ökonomische und ökologische Wirkung der Produktion ins Verhältnis. Der GPI ist umso höher, je größer die ökonomische Produktivität ist und je geringer die Umweltbelastungen sind, siehe Gleichung (2) (Hur et al., 2004).

$$(2) \text{ GPI} = \frac{\text{Produktivität}}{\text{Umweltbelastung}}$$

In Gleichung (2) werden ausschließlich Umweltbelastungen berücksichtigt, die eine negative Wirkung auf die Umwelt haben, wie z.B. der Ausstoß von Emissionen. Immer mehr Unternehmen gleichen ihre Umweltbelastungen jedoch über positive Wirkungen aus, indem bspw. Reststoffe nicht entsorgt werden, sondern als sekundärer Input erneut eingesetzt werden. Um einen differenzierten Blick auf die Umweltwirkungen zu erhalten, wird die Kennzahl Umweltbelastung aus Gleichung (2) ersetzt durch das Verhältnis aus erzeugter und eingesetzter Umweltwirkung, siehe Gleichung (3) (Steven / Blank, 2016).

$$(3) \text{ Umweltwirkung} = \frac{\text{erzeugte Umweltwirkung}}{\text{eingesetzte Umweltwirkung}}$$

Die erzeugte Umweltwirkung entspricht der Umweltbelastung, die auch in Gleichung (2) berücksichtigt wurde und sich negativ auf die Umwelt auswirkt, wie z.B. Abfälle, Abwässer oder Emissionen. Die eingesetzte Umweltwirkung ist jene, die in die Produktion zurückgeführt wird und die Umwelt nicht weiter schädigt, wie die Wiederverwendung oder das Recycling von Stoffen (Steven/Blank, 2016).

Umweltwirkungen werden sowohl als erzeugte als auch als eingesetzte Umweltwirkungen in heterogenen Größen gemessen, sodass eine einheitliche Bewertung erforderlich ist, um die Werte miteinander verrechnen und vergleichen zu können. Ein Vorschlag zur Bewertung wird im weiteren Verlauf der Arbeit vorgestellt.

Der GPI ergibt sich demnach wie folgt:

$$(4) \text{ GPI} = \frac{\left(\frac{\text{Output}}{\text{Input}}\right)}{\left(\frac{\text{erzeugte Umweltwirkung}}{\text{eingesetzte Umweltwirkung}}\right)}$$

Der GPI erfüllt ebenfalls die Gütekriterien der Bewertung, da alle Werte, die es einzusetzen gilt, quantitativ messbar sind. Die Objektivität kann daher nur durch die Auswahl der Werte

gefährdet werden und nicht durch die Bewertung selbst. Auch die Reliabilität und Validität sind erfüllt, solange im Vorhinein festgelegt wird, welche Werte zu betrachten sind. Da der GPI allerdings nur zwei von drei Nachhaltigkeitsdimensionen ins Verhältnis setzt, kann durch ihn keine Bewertung einer ganzheitlichen Nachhaltigkeit erfolgen.

3.2 Overall Equipment Effectiveness

Die Overall Equipment Effectiveness (OEE) ist eine produktionswirtschaftliche Kennzahl, die Effizienz- und Effektivitätsverluste aufdeckt (Perlewitz, 1999). Die OEE wird im Anlagencontrolling genutzt, um die Verfügbarkeit einer Produktionsanlage zu beurteilen (Nakajima, 1989). Dazu berücksichtigt die OEE die drei Komponenten Nutzungszeit, Nutzungseffizienz und Produktqualität, um eine Aussage über die Güte der Produktion auf einer Anlage zu treffen. Für jede Komponente wird eine Kennzahl abgeleitet, die derart konzipiert ist, dass die Werte im Bereich $[0;1]$ liegen. Jede dieser Kennzahlen sowie die OEE sollen einen möglichst hohen Wert annehmen.

Die **Nutzungszeit** wird über die Kennzahl Anlagenverfügbarkeit dargestellt, die mit Gleichung (5) berechnet wird.

$$(5) \text{ Anlagenverfügbarkeit} = \frac{\text{Laufzeit} - \text{Ausfallzeit}}{\text{Laufzeit}}$$

Die Anlagenverfügbarkeit setzt die tatsächliche Laufzeit mit der technisch möglichen Laufzeit ins Verhältnis. Je höher der Wert ist, desto geringer sind die Zeitverluste während der Nutzung.

Die **Nutzungseffizienz** wird über den Leistungsgrad ermittelt, der über die Gleichung (6) berechnet wird.

$$(6) \text{ Leistungsgrad} = \frac{\text{optimale Taktzeit} \cdot \text{Stückzahl}}{\text{Laufzeit} - \text{Ausfallzeit}}$$

Der Leistungsgrad gibt an, ob die Produktion während der tatsächlichen Laufzeit effizient ist oder ob es zu Verlusten durch Minderleistung kommt.

Die **Produktqualität** wird über die Qualitätsrate ermittelt. Gleichung (7) stellt die Kennzahl dar.

$$(7) \text{ Qualitätsrate} = \frac{\text{Stückzahl} - (\text{Ausschuss} + \text{Nacharbeit})}{\text{Stückzahl}}$$

Die Qualitätsrate ermittelt, welcher Anteil an produzierten Produkten genutzt werden kann. Dazu wird der Anteil der fehlerfreien Produkte an den insgesamt hergestellten Produkten berechnet.

Die OEE ergibt sich als Produkt der drei Kennzahlen Anlagenverfügbarkeit, Leistungsgrad und Qualitätsrate, siehe Gleichung (8) (Dal et al., 2000). Die Kennzahl mit dem geringsten Wert stellt dabei den Bereich mit dem höchsten Effektivitäts- und Effizienzverlust dar und sollte der erste Ansatzpunkt für Verbesserungsmaßnahmen sein (Steven, 2016). Da jede Kennzahl im Wertebereich [0;1] liegt, liegt auch das Produkt, die OEE, im Wertebereich [0;1]. Der Wert der berechneten OEE evaluiert den Abstand zum theoretischen Idealwert Eins.

$$(8) OEE = \text{Anlagenverfügbarkeit} \cdot \text{Leistungsgrad} \cdot \text{Qualitätsrate}$$

4. Nachhaltige Produktivität

4.1 Grundgerüst der nachhaltigen Produktivität

Vor dem Hintergrund der aktuellen Nachhaltigkeitsdebatte und des öffentlichen Drucks auf Unternehmen, sich sozial zu engagieren, ist ein Index, der nur ökonomische und ökologische Belange einer Produktion berücksichtigt, nicht mehr ausreichend. Um alle drei Dimensionen zu berücksichtigen, wird daher der GPI zu einem nachhaltigen Produktivitätsindex (NPI) weiterentwickelt, der alle Dimensionen berücksichtigt.

Ausgangspunkt für die Entwicklung des NPI ist neben dem GPI die OEE, um das Ziel der Aufdeckung von Effizienz- und Effektivitätsverlusten aufzunehmen. Wird der Gedanke der OEE auf die nachhaltige Produktivität übertragen, kann man den NPI als Produkt von drei Kennzahlen für die ökonomische, ökologische und soziale Dimension der Nachhaltigkeit konstruieren. Stellt man Gleichung (4) um, ergibt sich der GPI bereits als Produkt einer ökonomischen und ökologischen Kennzahl, siehe Gleichung (9).

$$(9) \text{ GPI} = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} \cdot \frac{\text{eingesetzte Umweltwirkung}}{\text{erzeugte Umweltwirkung}}$$

Um nun auch die dritte Dimension zu integrieren, wird der GPI um einen dritten Faktor ergänzt, der die soziale Dimension darstellt. Die ökonomische und ökologische Dimension werden jeweils über das Verhältnis zweier Kennzahlen dargestellt. Dabei wird das Ziel einer Erhöhung im Zähler – Output bzw. eingesetzte Umweltwirkung – und eine Verringerung im Nenner – Input bzw. erzeugte Umweltwirkung – angestrebt. Dieser Gedanke wird auch für die soziale Dimension fortgeführt.

Mit der sozialen Wirkung werden die Auswirkungen der Produktion auf menschliche Bedürfnisse erfasst (Blum et al., 2020). Die soziale Wirkung wird in die Kennzahlen soziales Engagement und soziale Probleme aufgeteilt. Das soziale Engagement berücksichtigt positive Wirkungen wie Bildungsmaßnahmen und Spenden. Die sozialen Probleme bewerten Aspekte wie Krankentage und Kinderarbeit. Die soziale Wirkung wird durch eine subjektive Erhebung bewertet. Abbildung 3 und Gleichung (10) stellen die Struktur des NPI dar.

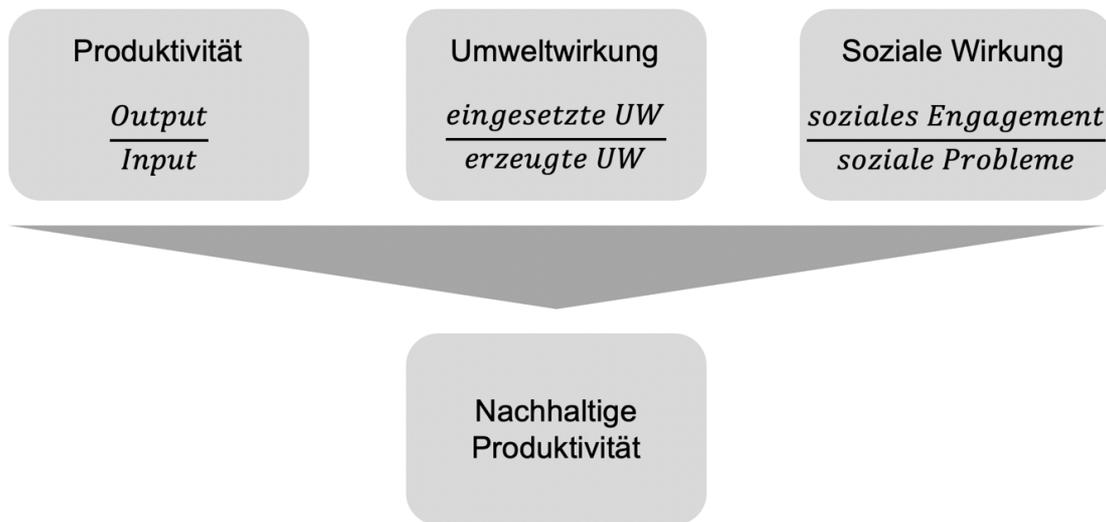


Abbildung 3: Zusammensetzung der nachhaltigen Produktivität

$$(10) \quad NPI = \frac{Output}{Input} \cdot \frac{eingesetzte Umweltwirkung}{erzeugte Umweltwirkung} \cdot \frac{soziales Engagement}{soziale Probleme}$$

4.2 Normierung der Werte

Um eine aussagekräftige Bewertung zu erhalten, auf deren Grundlage Maßnahmen abgeleitet werden können, müssen die Werte vergleichbar und interpretierbar sein. Dazu eignet sich eine Normierung. Ziel dieser Normierung ist es, dass in jeder Dimension sowie für den NPI Werte zwischen Null und Eins erreicht werden können, wobei der Wert Eins den theoretischen Idealfall darstellt.

Da sich keine maximale ganzheitliche Nachhaltigkeit bestimmen lässt, wird das Benchmarking zur Hilfe genommen. Das Benchmarking ist ein Instrument zum systematischen Vergleich zwischen verschiedenen Vergleichsobjekten auf der Basis von Leistungskriterien (Spendolini, 1992; Neely et al., 1996) mit dem Ziel, den Abstand zum Best-Practice-Objekt zu ermitteln (Fedor et al., 1996). Daher eignet es sich für den vorliegenden Bewertungsansatz.

Für eine höhere Aussagekraft wird bei der Bewertung mit dem NPI für jede Dimension ein Benchmarking-Prozess durchgeführt und nicht für den NPI insgesamt. Als Referenzwert

kommen verschiedene Vergleichsobjekte in Frage. So können Produkte, Prozesse, Unternehmen oder Wertschöpfungsketten verglichen werden. Als Benchmark wird ein Unternehmen, eine Abteilung oder Produkt verwendet, das als Best-Practice bezeichnet werden kann (Töpfer, 1997). Das Ziel ist es, Unterschiede zum Best-Practice-Objekt zu identifizieren und anschließend Strategien und Maßnahmen abzuleiten, um die Differenz zu verringern (Klünder, 2022). Wenn ein derartiges Vergleichsobjekt fehlt, können andere Methoden eingesetzt werden, die ebenfalls einen Vergleich ermöglichen (Steven, 2016):

- Der **Zeitvergleich** zu Vorjahren stellt die Entwicklung der ganzheitlichen Nachhaltigkeit im eigenen Unternehmen dar.
- Die Nutzung von **Zielvorgaben** ist insbesondere für die Festlegung realistischer Ziele und für die Kommunikation mit Stakeholdern interessant.

Dem Best-Practice-Objekt wird der Wert Eins zugeordnet. Alle anderen Objekte erhalten über die Transformation aus Gleichung (11) Werte im Intervall [0;1].

$$(11) \quad Wert_{transformiert} = \frac{Wert_{Vergleichsobjekt\ x}}{Wert_{Best-Practice-Objekt}}$$

Wird dieses Vorgehen für jede Dimensionen angewendet, liegen die Kennzahlen aller drei Dimensionen im Bereich [0;1] und somit liegt auch das Produkt, der NPI, im Intervall [0;1]. Die Differenz des NPI zum Wert Eins gibt die Abweichung zum theoretischen Idealfall an.

4.3 Gewichtung der Dimensionen

In der Darstellung aus Gleichung (10) werden alle drei Dimensionen gleich stark gewichtet. Das führt dazu, dass beispielsweise eine schlechte Umweltwirkung durch eine hohe Produktivität ausgeglichen werden kann, was jedoch vor dem Hintergrund der aktuellen Nachhaltigkeitsdebatte nicht zielführend ist. Durch Exponenten lassen sich die Komponenten des NPI entsprechend den jeweiligen Prioritäten unterschiedlich gewichten.

Aktuell stellen Umweltprobleme die größte Herausforderung für Unternehmen dar (Kropp, 2019). Ökonomische Belange hingegen wurden lange Zeit als die einzige relevante Dimension betrachtet und sind demnach am wenigsten problematisch. Daher sollte eine ökologische Verbesserung vor einer sozialen und diese wiederum vor einer ökonomischen angestrebt werden.

Bei der Festlegung der Exponenten sind zwei Möglichkeiten denkbar. Entweder kann eine Verstärkung der entsprechenden Werte durch eine Erhöhung erreicht werden, oder es kann eine Bestrafung für eine Abweichung vom Referenzwert erfolgen. Für die erste Möglichkeit spricht, dass die Werte insgesamt größer werden und damit anschaulicher sind. Für die zweite Möglichkeit spricht die Praktikabilität. Aufgrund der Normierung aus Abschnitt 4.2 müssten für die erste Möglichkeit die Exponenten zwischen Null und Eins liegen. Um nun eine Verstärkung der ökologischen Dimension zu erreichen, müsste der Exponent kleiner sein als die Werte für die anderen beiden Dimensionen. Hingegen bei der zweiten Möglichkeit erhält die ökologische Dimension den größten Exponenten und alle Exponenten sind größer oder gleich Eins (Aufderheide / Steven, 2021). Daher wird nachfolgend die zweite Möglichkeit genutzt, auch wenn dabei die Werte des NPI sehr klein werden können. Die Exponenten müssen demnach der Gleichung (12) genügen, wobei α der ökonomischen Dimension, β der ökologischen Dimension und γ der sozialen Dimension zugeordnet sind.

$$(12) \quad \beta > \gamma > \alpha \geq 1$$

Diese Reihenfolge und die Wahl der Exponenten größer oder gleich Eins sorgt dafür, dass eine Abweichung vom Referenzwert in der ökologischen Dimension stärker bestraft wird als in den anderen beiden Dimensionen. Andersherum wirkt sich eine Verbesserung dieser Dimension ebenfalls stärker auf den NPI aus. Der NPI lässt sich insgesamt mittels folgender Gleichung berechnen:

$$(13) \quad NPI = \left(\frac{\text{Output}}{\text{Input}} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{\text{eingesetzte Umweltwirkung}}{\text{erzeugte Umweltwirkung}} \right)^\beta \cdot \left(\frac{\text{soziales Engagement}}{\text{soziale Probleme}} \right)^\gamma$$

$$\text{mit } \beta > \gamma > \alpha \geq 1$$

4.4 Auswirkungen zirkulärer Zielsetzungen auf den nachhaltigen Produktivitätsindex

Der NPI misst die ganzheitliche Nachhaltigkeit von Unternehmen, Prozessen oder Produkten im Vergleich zu anderen Vergleichsobjekten. Jedoch wird bisher nicht explizit auf die Kreislaufwirtschaft eingegangen, die zahlreiche Potentiale für die Nachhaltigkeit bereithält, u.a. (Halog / Anieke, 2021):

- Verlängerung des Lebenszyklus

- Erhöhung der Menge eingesetzter sekundärer Rohstoffe und Verringerung des Bedarfs an Primärrohstoffen
- Verringerung der entsorgten Menge

Diese Aspekte werden im bisherigen NPI nur indirekt berücksichtigt. Daher wird eine entsprechende Weiterentwicklung vorgenommen. Das Ziel ist es, die Kreisläufe der Circular Economy explizit bei der Berechnung des NPI abzubilden (Rudolph, 2018; Prox, 2022), vgl. Abbildung 4:

- **Wiederverwendung:** eine direkte Nutzung ohne Überarbeitung des Produktes in derselben Wertschöpfungskette
- **Wiederverwertung:** eine erneute Nutzung mit Überarbeitung in derselben Wertschöpfungskette
- **Weiterverwendung und -verwertung:** eine erneute Nutzung ohne bzw. mit Überarbeitung in einer anderen Wertschöpfungskette, wobei die Überarbeitung ebenfalls außerhalb der betrachteten Wertschöpfungskette stattfindet
- **Internes Recycling:** eine Zerlegung des Produktes in seine Bauteile und die Nutzung von sekundären Rohstoffen in derselben Wertschöpfungskette
- **Externes Recycling:** eine Zerlegung des Produktes in seine Bauteile und der Verkauf von sekundären Rohstoffen in eine andere Wertschöpfungskette

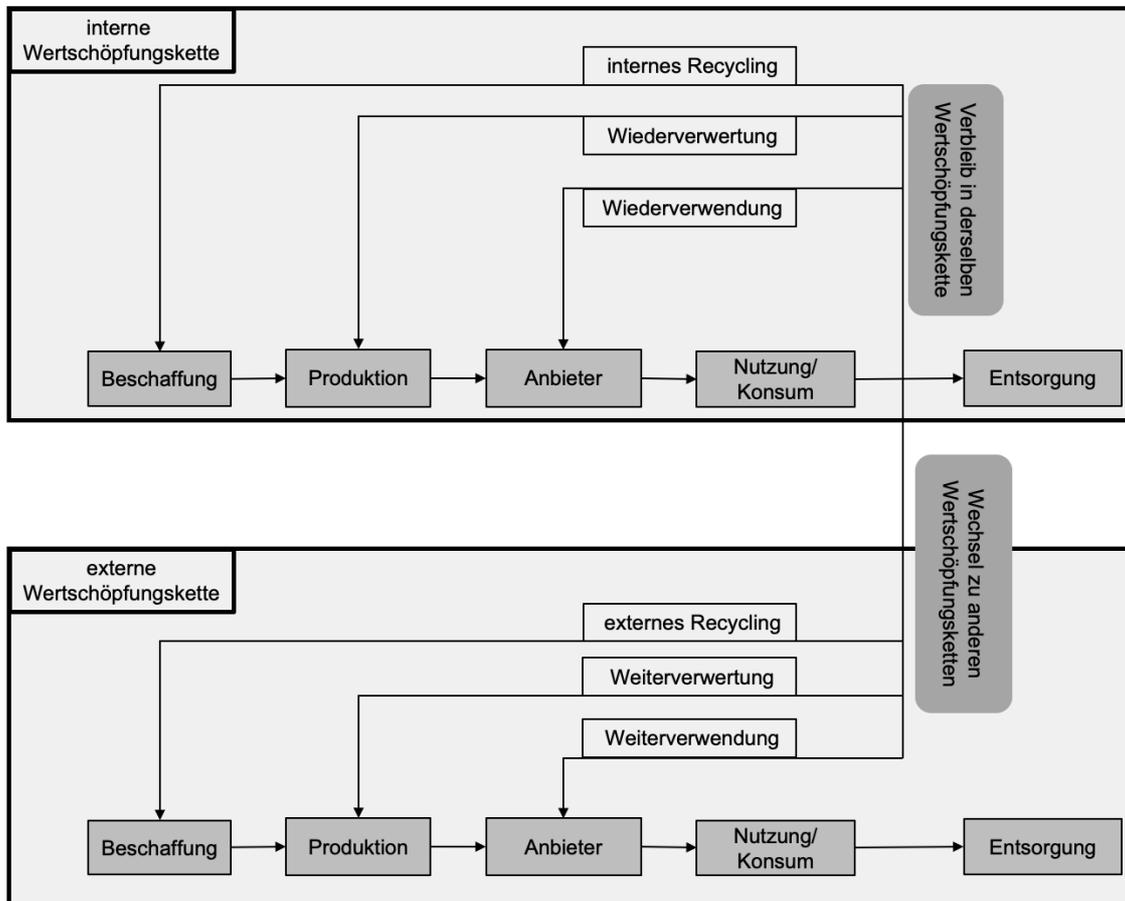


Abbildung 4: Kreisläufe der Circular Economy

Die Kreisläufe können effizient durchgeführt werden, wenn Unternehmen die Verantwortung tragen und Kernkompetenzen gebündelt werden können. Dies ist insbesondere bei SCPSS der Fall, wenn sie wie in Abschnitt 2.2 beschrieben angeboten werden. Daher werden die nachfolgenden Überlegungen auf das Beispiel der SCPSS eingegrenzt.

4.4.1 Wiederverwendung von SCPSS

Eine Wiederverwendung von SCPSS meint im weitesten Sinne das Teilen von Gütern (Weiber / Lichter, 2020). Hierzu wird das Sachgut des SCPSS an den Anbieter zurückgegeben, der dieses ohne Aufbereitung und Umrüstung direkt für eine neue Nutzung bei einem anderen Kunden bereitstellt. Somit kann die Nutzungsdauer des Sachgutes verlängert werden. Der ökonomische Wert des SCPSS steigt. Dies erhöht den Output der Gleichung (13).

Da eine längere Nutzung zu höheren Einnahmen und somit zu einem höheren Output führt, der direkt mit der Nutzung des SCPSS zusammenhängt, ist keine Anpassung der Gleichung notwendig.

4.4.2 Wiederverwertung von SCPSS

Eine Wiederverwertung bedeutet die erneute Nutzung nach einer Überarbeitung oder Aufbereitung, ohne dass das Produkt gänzlich in seine Bauteile zerlegt werden muss. Häufig werden lediglich kritische Bauteile, die einen höheren Verschleiß aufweisen, ausgetauscht. Anschließend kann das Sachgut zu seinem eigentlichen Zwecke erneut verwendet werden oder es wird bei anderen Kunden installiert.

Die Wiederverwertung benötigt somit neuen Input, erwirtschaftet aber auch neuen Output. Beides weist einen direkten Zusammenhang mit der Nutzung des SCPSS auf und wird daher nicht gesondert in die Gleichung (13) aufgenommen.

4.4.3 Weiterverwendung und -verwertung von SCPSS

Sowohl die Weiterverwendung als auch die Weiterverwertung bedeuten eine Nutzung des Produktes außerhalb der Wertschöpfungskette. Bei der Weiterverwertung ist jedoch eine zusätzliche Aufbereitung notwendig. Diese wird meistens ebenfalls außerhalb der betrachteten Wertschöpfungskette durchgeführt, weshalb beide Prozesse für den NPI gleichbehandelt werden können.

Eine Weiterverwendung oder -verwertung stellt einen Verkauf des Sachgutes dar und erhöht somit den generierten Output in Gleichung (13). Eine Anpassung der Gleichung ist jedoch nicht notwendig, da der Output die Summe aller generierten Einnahmen aus der Nutzung des SCPSS ist.

4.4.4 Recycling von SCPSS

Das Recycling hat eine Auswirkung auf den Input, da sekundäre Rohstoffe vor primären Rohstoffen genutzt werden sollten, um Ressourcen zu sparen (Corona et al., 2019). Der Input aus Gleichung (13) wird daher aufgeteilt in einen Summanden für die primären Rohstoffe und einen Summanden für die sekundären Rohstoffe. Da der Einsatz von primären

Rohstoffen durch den neuen Abbau der Ressourcen umweltschädlicher ist, wird der primäre Input mit einem Gewichtungsfaktor $\mu > 1$ bestraft (siehe Gleichung (14)).

$$(14) \quad \text{Input} = \mu \cdot \text{primärer Input} + \text{sekundärer Input}$$

4.4.4.1 Internes Recycling

Können die Produkte des SCPSS nicht weiter- oder wiederverwendet werden und ist auch eine Aufbereitung nicht lohnenswert, können sie in ihre Bauteile zerlegt werden und die Rohstoffe weiterverwendet werden. Bei einem internen Recycling verbleiben die Rohstoffe in der Wertschöpfungskette und werden erneut eingesetzt. Die Rohstoffe können somit innerhalb der Produktion zur Herstellung neuer Produkte wiederverwendet werden (Huber, 2016). Der Output kann damit erhöht werden, ohne dass ein Einsatz primärer Rohstoffe nötig ist.

4.4.4.2 Externes Recycling

Die aus dem Recycling gewonnenen Rohstoffe müssen nicht zwangsläufig in derselben Wertschöpfungskette verbleiben, sondern können auch in anderen Wertschöpfungsketten eingesetzt werden. Dies wird als externes Recycling bezeichnet. Die recycelten Rohstoffe werden an andere Wertschöpfungsketten verkauft und erhöhen somit den Output der Wertschöpfungskette. Um das externe Recycling konkret in der Gleichung (13) abzubilden, wird der Output wie in Gleichung (15) erfasst:

$$(15) \quad \text{Output} = \text{Nutzungsorientierter Output} + \text{Recycelte Rohstoffe}$$

Der nutzungsorientierte Output ist die Summe aller generierten Umsätze aus der ersten Nutzung, der Wiederverwendung und -verwertung sowie dem Verkauf in andere Wertschöpfungsketten zur Weiterverwendung und -verwertung. Die recycelten Rohstoffe sind die Umsätze aus dem Verkauf beim externen Recycling.

Insgesamt sind nur wenige Anpassungen des NPI erforderlich, um die zirkulären Wertschöpfungsprozesse zu integrieren. Sie beziehen sich sämtlich auf die explizite Berücksichtigung der Kreisläufe in der ökonomischen Dimension. Gleichung (16) stellt den NPI zusammenfassend dar:

$$(16) \quad NPI = \left(\frac{\text{Output} + \text{recycelte Rohstoffe}}{\mu \cdot \text{primärer Input} + \text{sekundärer Input}} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{\text{eingesetzte Umweltwirkung}}{\text{erzeugte Umweltwirkung}} \right)^\beta \cdot \left(\frac{\text{soziales Engagement}}{\text{soziale Probleme}} \right)^\gamma$$

mit $\beta > \gamma > \alpha \geq 1$ und $\mu > 1$

4.5 Auswirkungen von Netzwerkstrukturen auf den nachhaltigen Produktivitätsindex

Die Zusammenarbeit in SCPSEs schafft eine zusammenhängende Netzwerkstruktur zwischen den Wertschöpfungspartnern (Alcayaga et al., 2019). Die oben beschriebene Zirkularität kann nicht durch ein Unternehmen erreicht werden, sondern benötigt ein Anbieternetzwerk mit verschiedenen Wertschöpfungspartnern, wie es in Abschnitt 2.2 für die PV-Anlagen vorgestellt wurde. Neben der Integration der Kreisläufe in den NPI sind auch Auswirkungen durch Netzwerkstrukturen relevant, die nachfolgend vorgestellt werden.

Zielt ein Netzwerk auf eine ganzheitliche Nachhaltigkeit ab, werden neben ökonomischen Maßnahmen auch ökologische und soziale ergriffen und ausgebaut (Saari et al., 2021). Diese lassen sich mittels NPI bewerten. Es können grundsätzlich folgende Auswirkungen des SCPSE auf den NPI im Vergleich zu herkömmlichen PSS identifiziert werden.

4.5.1 Auswirkungen auf den Output

Der Output erhöht sich durch die Kreisläufe. Weiter können durch eine enge Zusammenarbeit der Wertschöpfungspartner SCPSS effizienter gewartet und repariert werden, was die Nutzungsdauer verlängert und bei einer nutzungsabhängigen Zahlung ebenfalls den Output erhöht. Um den Nutzen der SCPSS für Kunden weiter zu erhöhen, können zusätzliche Dienstleistungen und smarte Lösungen wie zum Beispiel eine App zur Überwachung und Kommunikation integriert werden.

Durch das in Kapitel 2 beschriebene Angebot im Netzwerk sind die verbauten Rohstoffe besser identifizierbar und die Kreislaufführung wird gefördert, was zu einer Erhöhung des Wertes der SCPSS führt und den Output steigert.

4.5.2 Auswirkungen auf den Input

Wie bereits beschrieben, sind Ressourcen in einem Netzwerk besser aufzufinden und somit leichter erneut zu verwenden, was den Wert der sekundären Rohstoffe im Vergleich zum Wert der primären Rohstoffe erhöht.

Auch wenn eine Wiederverwertung Input zur Aufbereitung benötigt, ist dieser unterproportional zum steigenden Output, der durch die Wiederverwertung entsteht (Friedemann / Schumann, 2010). Durch die Nutzung digitaler Technologien wie beispielsweise ein digitaler Zwilling des SCPSS und künstliche Intelligenz kann genauer vorhergesagt werden, wann welcher Input benötigt wird, sodass weniger Input gelagert werden muss (Alcayaga / Hansen, 2022).

Insgesamt wird die absolute Menge an benötigtem Input für PV-Anlagen als SCPSS zwar steigen, relativ gesehen sinkt sie jedoch, da die Nutzungsdauer der PV-Anlagen verlängert werden kann. Somit wird eine steigende Tendenz für die Produktivität im NPI erreicht.

4.5.3 Auswirkungen auf die Umweltwirkungen

Die Wiederverwendung erhöht den absoluten Wert der erzeugten Umweltwirkungen des SCPSS (Sander et al., 2022), da bei der Aufbereitung und erneuten Nutzung ebenfalls negative Umweltwirkungen entstehen. Weiter sind mehrere Transportvorgänge zwischen den Wertschöpfungspartnern zur Aufbereitung und zu neuen Kunden notwendig, die zusätzliche Umweltwirkungen freisetzen. Ein großer Anteil der erzeugten Umweltwirkungen entsteht aber bei einer unsachgemäßen und zu frühen Entsorgung. Hier besteht ein großes Senkungspotential durch die Kreislaufführung im Netzwerk (Oettmeier / Hofmann, 2019). Durch die enge Zusammenarbeit im SCPSE können mehr Rohstoffe im Kreislauf geführt werden, was die erzeugten Umweltwirkungen reduziert und die eingesetzten Umweltwirkungen erhöht, sodass sich der Wert der ökologischen Komponente im NPI erhöht.

4.5.4 Auswirkungen auf die sozialen Wirkungen

Eine stärkere Zusammenarbeit im Netzwerk kann dafür sorgen, dass soziale Richtlinien stärker überprüft werden und demzufolge auch vermehrt eingesetzt und eingehalten werden. Somit sorgt das Netzwerk für eine Steigerung der sozialen Wirkung und Erhöhung des Wertes im NPI.

4.6 Kennzahlenauswahl für den nachhaltigen Produktivitätsindex

Der NPI ist ein Index, der verschiedene Kennzahlen kombiniert (Hur et al., 2004). Bisher wurde das Grundgerüst des NPI vorgestellt und für SCPSE weiterentwickelt. Es fehlt jedoch ein konkreter Vorschlag, welche Kennzahlen zu berücksichtigen sind.

Während die Auswahl der ökonomischen Kennzahlen unproblematisch ist, ist die Auswahl der ökologischen und sozialen Kennzahlen deutlich schwieriger, da diese teilweise nicht quantitativ messbar oder subjektiv beeinflussbar sind. In Nachhaltigkeitsberichten von Unternehmen werden jedoch häufig ähnliche Kennzahlen verwendet. Daher baut die nachfolgende Analyse auf der Auswertung von 40 Nachhaltigkeitsberichten der deutschen DAX-40-Unternehmen auf und leitet daraus verschiedene Kennzahlen ab.

4.6.1 Finanzielle Kennzahlen

Die ökonomische Dimension wird traditionell durch finanzielle Kennzahlen dargestellt (Wördenweber, 2017). Daher verwendet der NPI ebenfalls finanzielle Kennzahlen für die ökonomische Dimension. Zur Ermittlung des nutzungsorientierten Outputs werden die Erlöse aus der Nutzung des SCPSS, der Wiederverwendung, -verwertung und dem Verkauf der SCPSS zur Weiterverwendung und -verwertung herangezogen. Zur Bewertung des recycelten Rohstoffs werden die Erlöse aus dem Verkauf der Bauteile des SCPSS genutzt.

Der Input ist die Summe des primären und sekundären Inputs. Für beide Summanden werden jeweils die Kosten, die für das SCPSS entstehen, als Berechnungsgrundlage verwendet.

4.6.2 Nicht-finanzielle Kennzahlen

Die nicht-finanziellen Kennzahlen für die ökologische und soziale Dimension sind schwieriger zu ermitteln als die finanziellen Kennzahlen. Daher werden diese auf der Grundlage einer Analyse der deutschen DAX-40-Unternehmen festgesetzt. Weitere Verfahren zur Kennzahlenauswahl sind möglich, werden hier aber nicht weiter thematisiert, da der NPI nur in seinen Grundzügen vorgestellt wird.

Die Analyse der DAX-40-Unternehmen wurde in der ersten Hälfte des Jahres 2022 durchgeführt. Es wurde der jeweils aktuellste Bericht eines Unternehmens verwendet, der online

verfügbar war. Alle Kennzahlen wurden erfasst und nach ihrer Häufigkeit sortiert. Eine erste Durchsicht zeigte bereits, dass viele verschiedene Kennzahlen angegeben wurden, die sich jedoch teilweise auf dieselben Sachverhalte beziehen. Ein Beispiel ist das Abfallmanagement. Dieser Begriff wurde in verschiedenen Berichten dazu verwendet, Recyclingquoten anzugeben. Andere Berichte nutzen dafür explizit den Begriff der Recyclingquoten. Insgesamt sind in den 40 Berichten 19 ökologische Kennzahlen, die eine positive Umweltwirkung evaluieren, 12 ökologische Kennzahlen, die eine negative Umweltwirkung beurteilen, und 25 soziale Kennzahlen zu finden.

Es wurden alle Kennzahlen, die in mindestens 15 der untersuchten Berichte aufgeführt wurden, näher betrachtet. Diese sind in Tabelle 1 aufgeführt und bilden die Grundlage für die Auswahl der Kennzahlen zur Berechnung des NPI. Die Tabelle gibt bereits einen Hinweis darauf, welche Kennzahlen im NPI berücksichtigt werden und welche trotz der Häufigkeit in den Berichten ausgeschlossen werden. Außerdem wird darauf eingegangen, ob ein Maximierungs- oder Minimierungsziel bei der jeweiligen Kennzahl verfolgt wird. Eine weitere Erläuterung der Kennzahlen folgt in den nächsten Abschnitten.

Da viele Kennzahlen in der Umwelt- und Sozialdimension für die Erreichung von Nachhaltigkeitszielen relevant sind, aber nicht monetär quantifiziert werden können, werden nachfolgend Klassen als Ordinalskala definiert und damit eine quantitative Darstellung der qualitativen Kennzahlen ermöglicht. Je detaillierter die Klassifizierung ist, desto konkretere Strategien und Maßnahmen lassen sich darauf aufbauend ableiten. Im Folgenden werden fünf Klassen pro Umwelt- und Sozialkennzahl gebildet, welche in Abhängigkeit von der Kennzahlenprägung mit den Punkten von Eins bis Fünf bewertet werden. Dabei steht Eins für die schlechteste und Fünf für die beste Kennzahlausprägung, wenn es sich um ein Maximierungsziel handelt. Bei einem Minimierungsziel steht Eins für die beste und Fünf für die schlechteste Kennzahlausprägung.

Tabelle 1: Deskriptive Statistik zur Analyse der Nachhaltigkeitsberichte

		Häufigkeit	Relevanz für NPI	Begründung des Ausschlusses	Ziel
Ökologische Kennzahlen, positive Wirkung	Gesamt:	19			Max.
	Anteil erneuerbare Energien	25	Ja		Max.
	Energieeinsparungen	18	Nein	Redundanz	Max.
	Wassereinsparungen	17	Nein	Redundanz	Max.
	Reduktion der Abfallmenge	17	Nein	Integration in Recyclingquote	Max.
	Recyclingquote	16	Ja		Max.
Ökologische Kennzahlen, negative Wirkung	Gesamt	12			Min.
	CO ₂ -Emissionen	36	Ja		Min.
	Wasserverbrauch	25	Ja		Min.
	Energieverbrauch	24	Ja		Min.
	Abfallmenge (Abfallmanagement)	19	Nein	Integration in Recyclingquote	Min.
Soziale Kennzahlen	Gesamt:	25			Max./Min.
	Mitarbeiterschulungen (Investitionen in Bildung)	31 (+5)	Ja		Max.
	Gleichberechtigung / Frauenquote	34	Ja		Max. / Min. zum Idealwert 50%
	Gesundheit & Sicherheit	29	Ja		Je nach Interpretation
	Diversität	26	Nein	Zu unterschiedliche Auswertungen	Je nach Interpretation
	Compliance	25	Nein	Geschlossene Frage	Je nach Interpretation
	Altersstruktur	21	Nein	Häufig unter Diversität erfasst	Je nach Interpretation
	Kennzahlen zu den Mitarbeitern nach Region und Abteilung	20	Nein	Zu unterschiedliche Auswertungen	Je nach Interpretation
	Spenden	17	Ja		Max.
	Menschenrechte	17	Nein	Geschlossene Frage	Je nach Interpretation

4.6.2.1 Kennzahlen der ökologischen Dimension

In den Nachhaltigkeitsberichten finden sich viele verschiedene Kennzahlen für die ökologische Dimension. Nach Durchsicht aller vierzig Berichte wurden neun Kennzahlen ausgewählt, die in mindestens 15 Berichten vorgekommen sind (siehe Tabelle 1). Fünf davon verfolgen ein Maximierungsziel, vier ein Minimierungsziel.

Jedoch entstehen bei den Kennzahlen Redundanzen, da beispielsweise eine Wasserreduktion nicht nur über die Höhe der Einsparungen gemessen werden kann, sondern auch über die tatsächlich verbrauchte Wassermenge. Daher ist es nicht sinnvoll, sowohl die Höhe der Wassereinsparungen als auch die tatsächliche Wassermenge in den Index aufzunehmen.

Nach der Entfernung von Redundanzen verbleiben fünf Kennzahlen für die Bewertung im NPI. Die Klassen je Kennzahl sind zusammengefasst in Tabelle 2 zu erkennen. Die Kennzahlen werden unterschieden in Größen, die zu erhöhen sind und in Größen, die zu verringern sind. Die zu erhöhenden Größen werden aufsummiert und fließen als eingesetzte Umweltwirkungen in den NPI ein. Die zu reduzierenden Werte werden ebenfalls aufsummiert und fließen dann als erzeugte Umweltwirkungen in den NPI ein.

Tabelle 2: Beispiel für die Klassifizierung von Kennzahlen für die ökologische Dimension

Klassifikation Kennzahl	Ziel	1 Punkt	2 Punkte	3 Punkte	4 Punkte	5 Punkte
Anteil erneuerbarer Energien	Max.	< 50% des gesamten Energieverbrauchs	50-70% des gesamten Energieverbrauchs	70-85% des gesamten Energieverbrauchs	85-95% des gesamten Energieverbrauchs	> 95% des gesamten Energieverbrauchs
Recyclingquote	Max.	< 30%	30-45%	46-60%	61-85%	> 85%
CO₂-Emissionen	Min.	< 50% des Durchschnitts	50-99% des Durchschnitts	Ca. gleich zum Durchschnitt	101-200% des Durchschnitts	Mehr als das Doppelte des Durchschnitts
Wasserverbrauch	Min.	< 50% des Durchschnitts	50-99% des Durchschnitts	Ca. gleich zum Durchschnitt	101-200% des Durchschnitts	Mehr als das Doppelte des Durchschnitts
Energieverbrauch	Min.	< 50% des Durchschnitts	50-99% des Durchschnitts	Ca. gleich zum Durchschnitt	101-200% des Durchschnitts	Mehr als das Doppelte des Durchschnitts

- **Anteil erneuerbarer Energien:** Aufgrund der endlichen natürlichen Ressourcen für die Energiegewinnung nehmen die erneuerbaren Energien einen besonderen Stellenwert in der aktuellen Nachhaltigkeitsdebatte ein. Obwohl es bereits viele Möglichkeiten zur Nutzung erneuerbarer Energien gibt, werden noch immer viele nicht-erneuerbare Energien wie Erdöl und Erdgas in großem Umfang genutzt (Hartmann, 2013). Das Ziel für 2030 in Deutschland ist die Nutzung von 80 % erneuerbarer Energien, mindestens 50 % sollten es sein. Die Einteilung der Klassen erfolgt entsprechend (siehe Tabelle 2).

- **Recyclingquote:** Eine Verbesserung der Abfallsituation kann durch eine Reduktion der Abfallmengen und eine höhere Recyclingquote erreicht werden. Da recycelte Rohstoffe zusätzlich als Input dienen und die Circular Economy fördern, wird diese Kennzahl berücksichtigt. Es sind Verwertungsquoten von über 85% möglich, was zu der in Tabelle 2 dargestellten Klassifizierung führt (Hauke / Pibler-Maslo, 2016).
- **CO₂-Emissionen:** CO₂-Emissionen können zwar quantifiziert werden, jedoch ist die Einteilung in Klassen schwierig. Daher ist hier ein Vergleich notwendig. Für die Klassifizierung kann der Durchschnitt der letzten Jahre oder ein Branchendurchschnitt verwendet werden. Wenn der Durchschnittswert annähernd erreicht wird, ist eine mittlere Klasse erreicht. Die anderen Klassen werden entsprechend definiert. Niedrigere Punkte werden für eine geringere Freisetzung von CO₂-Emissionen erreicht, entsprechend höhere Punkte für eine höhere Freisetzung. Alternativ können die Klassen auch durch spezifische Freisetzungsgrenzen gekennzeichnet werden (McKinnon / Piecyk, 2009).
- **Wasserverbrauch:** Ähnlich wie bei den CO₂-Emissionen ist eine Bewertung des Wasserverbrauchs durch absolute Zahlen nicht allgemeingültig möglich. Die Klassen können durch individuelle Verbrauchsgrenzen oder im Vergleich zum Durchschnitt der letzten Jahre oder zum Branchendurchschnitt bestimmt werden. Tabelle 2 enthält ein Beispiel für einen Vergleich mit dem Branchendurchschnitt. Wasser- und Energieeinsparungen sind eng miteinander verknüpft, vor allem beim Warmwasserverbrauch. Wird zu viel Grundwasser entnommen, kann dies regionale Auswirkungen auf die Wasserqualität und die Menge des Trinkwassers haben. Deshalb ist es für Unternehmen wichtig, die Wasserentnahme zu reduzieren. In der Literatur wird die Höhe der erzielbaren Wassereinsparungen unterschiedlich angegeben und reicht von 46 % (Blount et al., 2021) bis 75 % (Seckler, 1996) im Vergleich zu einem Referenzwert.
- **Energieverbrauch:** Die gleiche Problematik wie bei der Bewertung der CO₂-Emissionen und des Wasserverbrauchs besteht bei der Bewertung des Energieverbrauchs, der daher ebenfalls als Vergleich zu einem Referenzwert oder mittels individueller Verbrauchsgrenzen ermittelt werden muss. Die

Energieeinsparungen können bis zu 40 % im Vergleich zu einem Referenzwert betragen (Bertoldi / Huld, 2006), sodass bei dieser Kennzahl ein großes Potential zur Senkung besteht.

4.6.2.2 Kennzahlen der sozialen Dimension

Bei vielen Nachhaltigkeitsbewertungen werden nur die ökonomische und ökologische Dimension berücksichtigt. Soziale Aspekte haben jedoch eine hohe Relevanz und sollten daher nicht außer Acht gelassen werden. Bei der Auswertung der Nachhaltigkeitsberichte zeigte sich, dass zwar soziale Aspekte in den Berichten aufgeführt werden, jedoch meistens nicht quantifiziert wurden. Daraus kann geschlossen werden, dass die soziale Dimension an Wichtigkeit gewinnt, aber einem starken subjektiven Einfluss unterliegt.

Weiter ist die Quantifizierung in der Regel nicht möglich. Beispielsweise wurde die Kennzahl Compliance häufig angegeben. Hierrunter wurde entweder verstanden, ob es soziale Richtlinien im Unternehmen gibt oder ob diese überwiegend eingehalten werden. In beiden Fällen handelt es sich um eine geschlossene Fragestellung, die nur die Antwortmöglichkeiten Ja oder Nein zulässt. Eine Einordnung in fünf Klassen wäre somit nicht möglich, daher wird diese Kennzahl aus der weiteren Analyse ausgeschlossen.

Ein weiteres Ausschlusskriterium ist die Vielfalt der Auswertungsmöglichkeiten einer Kennzahl. Dazu kann die Kennzahl „Diversität“ im Unternehmen betrachtet werden. Während manche Unternehmen eine geschlossene Fragestellung daraus machen und nur Auskunft darüber geben, ob das Unternehmen divers ist oder nicht, schlüsseln andere Unternehmen genau auf, wie hoch die Prozentzahl einer bestimmten Gruppe im Unternehmen ist. Dabei wird die Diversität entweder auf das Geschlecht, die Nationalität oder das Alter bezogen. Auch diese Kennzahl eignet sich daher nicht für die Aufnahme in den NPI.

Kennzahlen, die quantifizierbar sind und in mindestens fünf Klassen eingeordnet werden können, sind nachfolgend aufgelistet und in Tabelle 3 zusammengefasst. Die Kennzahlen werden unterschieden in Größen, die zu erhöhen sind und in Größen, die zu verringern sind. Die Punktzahlen bei den zu erhöhenden Größen werden aufsummiert und fließen als soziales Engagement in den NPI ein. Die erzielten Punkte bei den zu reduzierenden Werten werden ebenfalls aufsummiert und fließen dann als soziale Probleme in den NPI ein. Eine

Ausnahme bildet die Frauenquote, bei der ein Zielwert zu erreichen ist. Sie wird im NPI innerhalb des sozialen Engagements berücksichtigt.

Tabelle 3: Beispiel für die Klassifizierung von Kennzahlen für die soziale Dimension

Klassifikation Kennzahl	Ziel	1 Punkt	2 Punkte	3 Punkte	4 Punkte	5 Punkte
Investitionen in Bildung	Max.	< 5% des Gewinns	5-10% des Gewinns	10-15% des Gewinns	15-20% des Gewinns	> 20% des Gewinns
Gleichstellung (Frauenquote)	Max. / Min.	< 10 % bzw. > 90 %	10 – 20 % bzw. 80 – 90 %	20 – 30 % bzw. 70 – 80 %	30 – 40 % bzw. 60 – 70 %	40 – 60 %
Spenden	Max.	< 5% des Gewinns	5-10% des Gewinns	10-15% des Gewinns	15-20% des Gewinns	> 20% des Gewinns
Gesundheit und Sicherheit	Min.	< 10 Krankentage pro Arbeitnehmer	10-15 Krankentage pro Arbeitnehmer	15-20 Krankentage pro Arbeitnehmer	20-25 Krankentage pro Arbeitnehmer	> 25 Krankentage pro Arbeitnehmer

- **Investitionen in Bildung:** Bildung und Mitarbeiterschulungen sind wichtig, um Fortschritt und Umsatzsteigerung zu ermöglichen und damit Arbeitsplätze zu sichern. Dies wirkt sich wiederum positiv auf die Mitarbeiterzufriedenheit aus. Die Höhe der Investitionen in Bildung ist eine passende Kennzahl. Um eine Vergleichbarkeit zwischen Unternehmen zu schaffen, wird eine Berechnung auf Basis des Gewinns vorgenommen. Je höher der Anteil des Gewinns ist, der für Bildung ausgegeben wird, desto besser ist die Bewertung, siehe Tabelle 3.
- **Gleichstellung (Frauenquote):** Die Gleichstellung der Geschlechter ist ein gesellschaftliches Thema, das derzeit in der Diskussion ist. Es gibt zwei Möglichkeiten, wie die Gleichstellung im Unternehmen angegangen werden kann. Es kann ein Vergleich zwischen der Zahl der männlichen und der weiblichen Beschäftigten angestellt werden, mit dem Ziel, eine Gleichgewichtung zu erreichen. Dieser Vergleich kann als Frauenquote festgelegt werden. Das Problem ist, dass es in verschiedenen Branchen ein Ungleichgewicht in eine der beiden Richtungen gibt, ohne dass das Unternehmen darauf großen Einfluss hat. Eine weitere Möglichkeit ist die Bewertung der Lohngleichheit, auch bekannt als geschlechtsspezifisches Lohngefälle. Je kleiner das geschlechtsspezifische Lohngefälle ist, desto größer ist die Geschlechtergerechtigkeit im Netzwerk. Da jedoch mehr Unternehmen die Frauenquote veröffentlichen, wird diese Variable trotz des oben genannten

Problems zur Bewertung der Gleichberechtigung herangezogen. Das Ziel ist es, eine Gleichberechtigung von ca. 50% zu erreichen. Abweichungen in beide Richtungen werden geringer bewertet.

- **Spenden:** Durch Spenden kann ein Netzwerk die soziale Situation außerhalb des eigenen Netzwerks verbessern. Je höher der Anteil des Gewinns ist, der für Spenden verwendet wird, desto besser ist die Bewertung, siehe Tabelle 3.
- **Gesundheit und Sicherheit:** Gesundheit und Sicherheit am Arbeitsplatz sind ein entscheidender Faktor für die soziale Nachhaltigkeitsdimension (Badura et al., 2022). Allerdings ist es schwierig, diesen Faktor zu messen. Unternehmen bewerten unter diesem Oberbegriff verschiedene Kennzahlen, wie z. B. die Fehlzeitenquote oder Krankentage im Unternehmen oder die Zahl der Arbeitsunfälle. Da Arbeitsunfälle häufig zu Krankentagen führen, wird die Messung der Krankentage als entscheidende Größe für den Arbeitsschutz angesehen. Für das Netzwerk sind die Krankentage als Durchschnittswert pro Arbeitnehmer anzugeben, um ein vergleichbares Maß zu erhalten. Die Statistiken der letzten 20 Jahre zeigen Werte zwischen 12 und über 21 Krankentagen (Badura et al., 2022). Daher kann eine Bewertung der Krankentage wie in Tabelle 3 vorgenommen werden.

5. Einsatz des nachhaltigen Produktivitätsindex zur Bewertung von Photovoltaikanlagen

Das vorherige Kapitel stellt den Bewertungsansatz NPI für die ganzheitliche Nachhaltigkeit eines Netzwerkes dar. In diesem Kapitel wird ein Beispiel erarbeitet und der NPI angewendet. Hierzu wird auf das Netzwerk einer zirkulären PV-Anlage zurückgegriffen, wie es in Kapitel 2 beschrieben wurde. Soweit wie möglich werden konkrete Daten herangezogen. Falls dies nicht möglich ist, werden begründete Annahmen getroffen, um die zirkuläre PV-Anlage mittels NPI zu bewerten.

5.1 Bewertung der ökonomischen Dimension

Die Preise der PV-Anlagen schwanken sehr stark, je nachdem, welche Module verbaut werden, wie groß die Flächen sind und wie die Ausrichtung auf dem Dach ist. Als Orientierung dienen nachfolgend zwei Modelle. Einerseits wird der Kauf einer PV-Anlage betrachtet und die dazugehörige Montage sowie die Kosten, die während des Betriebs entstehen. Andererseits wird die Miete einer PV-Anlage betrachtet. Für beide Fälle wird eine durchschnittliche Nutzungsdauer von 30 Jahren (IRENA / IEA-PVPS, 2016; Wegatech) und eine Anlagengröße von 10 Kilowattpeak (kWp) zugrundegelegt.

5.1.1 Output einer PV-Anlage

Wird eine PV-Anlage gemietet und nicht gekauft, wird für die Nutzung dieser bezahlt. Das Angebot der PV-Anlage als SCPSS zielt ebenfalls darauf ab, dass der Kunde lediglich für die Nutzung zahlt. Da bisher keine Daten für ein Angebot einer PV-Anlage als SCPSS im Netzwerk existieren, wird auf das Modell der Miete zurückgegriffen und die Kosten, die für den Kunden hierbei entstehen, als Größenordnung für den Output angesehen.

Die Miete einer PV-Anlage mit einer Größe von 10 kWp liegt jährlich zwischen 2.280 Euro und 2.760 Euro (Wegatech). Da PV-Anlagen überwiegend noch nicht derart digitalisiert im Netzwerk angeboten werden, wie es in Kapitel 2 vorgestellt wurde, wird der höhere Preis als Bewertungsgrundlage verwendet. Es kann unterstellt werden, dass ein Kunde grundsätzlich dazu bereit ist, einen höheren Preis zu bezahlen, wenn dadurch mehr Leistung erwartet werden kann. Über eine Nutzungsdauer von 30 Jahren kommt dann eine Mietsumme

von 82.800 Euro heraus. Etwaige Preisänderungen und Inflationsanpassungen werden zur Vereinfachung hier nicht weiter betrachtet.

Nach der Nutzungsdauer von 30 Jahren kann die PV-Anlage abgebaut und teilweise aufbereitet, wiederverwendet und recycelt werden. Aufgrund der fehlenden Datengrundlage wird an dieser Stelle auf eine weitere Aufschlüsselung möglicher Umsätze zur Erhöhung des Outputs verzichtet.

5.1.2 Input einer PV-Anlage

Zur Bewertung des Inputs der PV-Anlage und der entstehenden Kosten wird aus Vereinfachungsgründen das Beispiel eines Kaufs einer 10-kWp PV-Anlage genutzt, da so eine Bewertung der Bauteile und Leistungen während der Nutzungsphase erfolgen kann.

Die Kosten für eine PV-Anlage bestehen aus den Anschaffungs- und Betriebskosten. Zu den Anschaffungskosten zählen die Solarmodule, der Wechselrichter, die Verkabelung, das Montagesystem und das Einspeisemanagement. Die Kosten für die einzelnen Basiskomponenten gehen je nach Qualität stark auseinander. Wenn mit einer mittleren Qualität gerechnet wird, entstehen für die Anschaffung der Basiskomponenten sowie die Installation und Anbindung an das Stromnetz durchschnittliche Kosten von 12.500 Euro (Wegatech).

Aus Sicherheitsgründen und zur leichteren Bedienbarkeit entstehen weitere Kosten für Mess-, Regel- und Sicherheitssysteme von ca. 2.600 Euro (Wegatech). Somit fallen für die Beginning-of-Life-Phase rund 15.100 Euro an Kosten an.

In der Middle-of-Life-Phase muss mit weiteren Kosten für den Betrieb gerechnet werden. Hierzu zählen Wartungs- und Reinigungsarbeiten, sowie je nach Stromanbieter auch Kosten für die Nutzung des Stromzählers. Grundsätzlich wird bei dem Kauf einer PV-Anlage zu einer Versicherung geraten, die unter anderem Umweltschäden abdeckt. Durch die Versicherungen entfallen mögliche hohe Kosten für Reparaturen. Da die Notwendigkeit von Reparaturen ungewiss ist und nur rückwirkend bewertet werden kann, werden zur Vereinfachung hier die Kosten der Versicherung beachtet. Es entstehen durchschnittliche jährliche Kosten von 465 Euro (Wegatech). Über eine Nutzungsdauer von 30 Jahren sind das durchschnittliche Kosten von 13.950 Euro.

Nach der Nutzungsdauer ist die PV-Anlage zu demontieren und sachgerecht weiter zu behandeln oder zu entsorgen. Hierzu sind jedoch keine verlässlichen Zahlen zu finden, weshalb die End-of-Life-Phase keine Berücksichtigung in der Bewertung befindet.

Weiter fehlen die Kosten für Personal und Distribution. Es wird angenommen, dass diese Kosten bereits in den Angaben zum Kauf der PV-Anlage verrechnet wurden. Es erfolgte auch keine Unterscheidung in primären und sekundären Input. Daher wird angenommen, dass es sich bei allen Kosten um einen primären Input handelt. Für dieses Beispiel ist somit keine Gewichtung erforderlich.

5.1.3 Produktivität einer PV-Anlage

Die Produktivität der PV-Anlage wird unter Berücksichtigung der Analyse des Kapitels 4 wie in Gleichung (17) berechnet.

$$(17) \quad \textit{Produktivität} = \frac{\textit{nutzungsorientierter Output} + \textit{recycelte Rohstoffe}}{\mu \cdot \textit{primärer Input} + \textit{sekundärer Input}}$$

Werden die Werte aus Abschnitt 5.1.1 und 5.1.2 eingesetzt, ergibt sich folgende Produktivität für die PV-Anlage. Zur Vereinfachung wird der Input nicht weiter unterteilt und die Rohstoffkosten von Personal- und Verwaltungskosten nicht unterschieden.

$$(18) \quad \textit{Produktivität} = \frac{82.800 \textit{ Euro} + 0 \textit{ Euro}}{(15.100 + 13.950) + 0 \textit{ Euro}} = 2,85$$

Diese Produktivität wäre nun mit einem Benchmark zu vergleichen. Beispielsweise könnten andere Angebote genutzt werden oder ein Vergleich zu einer alternativen Stromerzeugung erfolgen.

5.2 Bewertung der ökologischen Dimension

5.2.1 Eingesetzte Umweltwirkung einer PV-Anlage

Bei den eingesetzten Umweltwirkungen werden nach Abschnitt 4.6.2.1 die Recyclingquote und der Anteil erneuerbarer Energien innerhalb der Wertschöpfungskette bewertet.

Die erste Kennzahl für die eingesetzten Umweltwirkungen ist der Anteil an erneuerbaren Energien an der gesamten Energienutzung in der Wertschöpfungskette. Bei einem Anbieter von PV-Anlagen kann davon ausgegangen werden, dass ein Großteil der Stromversorgung nachhaltig und erneuerbar ist. Für die Bewertung des NPI wird jedoch die komplette

Wertschöpfungskette betrachtet. Da viele verschiedene Wertschöpfungspartner im SCPSE zusammengeführt werden, ist eine allgemeingültige Bewertung schwierig und es liegen aktuell keine verlässlichen Daten vor. Daher wird eine Bewertung mit einem 50 bis 70 prozentigen Anteil erneuerbarer Energien angenommen, was einer Bewertung mit zwei Punkten entspricht (siehe Tabelle 2).

Die Recyclingfähigkeit von PV-Anlagen wird als sehr hoch eingeschätzt. Ca. 95% der Module lassen sich recyceln (Senec). Zu den restlichen Komponenten existieren keine verlässlichen Zahlen. Da die PV-Module den größten Anteil der PV-Anlage ausmachen, kann von mindestens 85% Recyclingquote einer PV-Anlage ausgegangen werden, was fünf Punkten in der Bewertung entspricht (siehe Tabelle 2).

5.2.2 Erzeugte Umweltwirkung einer PV-Anlage

Die erzeugten Umweltwirkungen setzen sich aus den drei Kennzahlen CO₂-Emissionen, Wasserverbrauch und Energieverbrauch zusammen. Das Problem der Bewertung liegt in der Komplexität der Netzwerkstruktur. Durch die Vielzahl der Wertschöpfungspartner ist eine konkrete Aussage nur erschwert möglich. Gleichzeitig fehlt es an verlässlichen Daten in der Literatur. Nachfolgend wird daher ein Vergleich zu einer Stromerzeugung aus Gaskraftwerken durchgeführt.

- **CO₂-Emissionen:** PV-Anlagen haben ein großes Einsparpotential im Vergleich zu anderen Stromerzeugungen. Lediglich Windkraftwerke erzeugen weniger CO₂-Emissionen. Im Vergleich zu einem Gaskraftwerk können bis zu 39% eingespart werden (Solarify). Da zu der Bewertung der CO₂-Emissionen nicht nur die Nutzung und Stromerzeugung zählt, sondern auch alle anderen Prozesse entlang der Wertschöpfungskette, müssen auch diese bewertet werden. Jedoch fehlt es hier an konkreten Zahlen. Daher werden die CO₂-Emissionen gemäß der Tabelle 2 mit zwei Punkten bewertet, was einem etwas geringeren Ausstoß im Vergleich zum Durchschnitt entspricht.
- **Wasserverbrauch:** Der Wasserverbrauch entlang der Wertschöpfungskette von PV-Anlagen wurde bisher nicht ermittelt. Er wird daher ca. gleich dem Wasserverbrauch der Wertschöpfungskette von Gaskraftwerken bewertet, was drei Punkten aus Tabelle 2 entspricht.

- **Energieverbrauch:** Der Energieverbrauch, der zur Produktion einer PV-Anlage benötigt wird, wird als hoch eingeschätzt. Die Amortisationszeit des Energieverbrauchs durch die Erzeugung wird mit durchschnittlich zwei Jahren angegeben (Guofu et al., 2016; Wu et al., 2017). Um eine Bewertung durchzuführen, wird noch der Wert für die Wertschöpfungskette einer Gaskraftanlage benötigt, welcher nicht gegeben ist. Es kann jedoch vermutet werden, dass die Produktion der PV-Anlage energieintensiver ist, die Nutzung jedoch energieärmer, sodass über die Nutzungsdauer von 30 Jahren eine leicht sinkende Tendenz im Vergleich zu einem Gaskraftwerk zu vermuten ist. Dies führt zu einer Bewertung mit zwei Punkten.

5.2.3 Umweltwirkung einer PV-Anlage

Die Umweltwirkungen lassen sich mit der Gleichung (19) berechnen.

$$(19) \quad \text{Umweltwirkung} = \frac{\text{eingesetzte Umweltwirkung}}{\text{erzeugte Umweltwirkung}}$$

Mit den aus Abschnitt 5.2.1 und 5.2.2 eingesetzten Werten ergibt sich die folgende Umweltwirkung:

$$(20) \quad \text{Umweltwirkung} = \frac{5+2}{2+3+2} = 1$$

Ähnlich wie bei der ökonomischen Bewertung ist nun der Wert der Umweltwirkung mit einem Vergleichsobjekt ins Verhältnis zu setzen. Aufgrund fehlender Vergleichsmöglichkeiten wird dieser Schritt hier nicht durchgeführt.

5.3 Bewertung der sozialen Dimension

Die Bewertung des sozialen Engagements setzt sich aus drei Kennzahlen zusammen. Da keine reale Wertschöpfungskette für dieses Beispiel verwendet wird, können lediglich Annahmen zur Verdeutlichung aufgeführt werden. Bewertet wird die gesamte Wertschöpfungskette und nicht allein die PV-Anlage.

- **Investitionen in Bildung:** Die fiktive Wertschöpfungskette der PV-Anlage versucht einen Ausbau des Geschäftsfeldes und investiert daher 8% des Gewinns in die Bildung der Mitarbeiter. Das ist gleichbedeutend mit einer Bewertung mit zwei Punkten aus Tabelle 3.

- **Gleichstellung (Frauenquote):** Die Frauenquote wird insbesondere durch die Handwerksbetriebe des Netzwerkes geschmälert, was zu einer angenommenen Quote von 20% und somit zu einer Bewertung mit zwei Punkten aus Tabelle 3 führt.
- **Spenden:** Die Wertschöpfungskette legt bisher keinen großen Wert auf Spenden, daher liegen diese unter 5% des Gewinns. Die Bewertung ist daher nur mit einem Punkt in die soziale Wirkung aufzunehmen.

Die sozialen Probleme werden nur durch die Kennzahl „Gesundheit und Sicherheit“ dargestellt. Die aktuellen Krankentage der Mitarbeiter liegen annahmegemäß bei 16 Tagen pro Arbeitnehmer, was zu einer Bewertung mit drei Punkten führt.

Um die soziale Wirkung insgesamt zu bewerten, wird Gleichung (21) verwendet:

$$(21) \quad \text{Soziale Wirkung} = \frac{2+2+1}{3} = 1,67$$

5.4 Nachhaltiger Produktivitätsindex einer PV-Anlage

In den vorherigen Abschnitten wurden die einzelnen Dimensionen der Wertschöpfungskette einer PV-Anlage bewertet. Um den NPI zu berechnen, sind die Werte zunächst zu normieren und anschließend zu multiplizieren. Außerdem wird eine Gewichtung der Dimensionen mittels Exponenten, wie in Abschnitt 4.3 beschrieben, vorgenommen.

Aufgrund eines fehlenden externen Benchmarks können zur Normierung Zielwerte verwendet werden, die einen anschließenden Vergleich und eine Berechnung des NPIs ermöglichen. Hierzu werden zur Verdeutlichung der Berechnung fiktive Annahmen getroffen.

5.4.1 Ökonomische Dimension

Das Ziel in der ökonomischen Dimension ist eine Erhöhung des Outputs durch eine verbesserte Kreislaufführung. Gleichzeitig wird eine Reduktion des primären Inputs bei einer gleichzeitigen Erhöhung des sekundären Inputs angestrebt. Die Veränderungen sollen bei diesem Beispiel zu einer Produktivität von 4 führen. Wird dieser Wert als Benchmark verwendet und erfolgt eine Normierung des aktuellen Ist-Wertes aus Abschnitt 5.1.3, ergibt sich folgender transformierter Wert:

$$(22) \quad Wert_{transformiert} = \frac{Wert_{Vergleichsobjekt\ x}}{Wert_{Best-Practice-Objekt}} = \frac{2,85}{4} = 0,713$$

5.4.2 Ökologische Dimension

Die fiktive Wertschöpfungskette setzt sich verschiedene Ziele, die in Tabelle 4 markiert sind. So soll die Recyclingquote gehalten werden, der Anteil an erneuerbaren Energien aber um einen Bewertungspunkt erhöht werden. Bei den erzeugten Umweltwirkungen wird eine Reduktion auf den jeweils kleinsten Wert angestrebt.

Tabelle 4: Zielbewertung ökologische Wirkung

Klassifikation Kennzahl	Ziel	1 Punkt	2 Punkte	3 Punkte	4 Punkte	5 Punkte
Anteil erneuerbarer Energien	Max.	< 50% des gesamten Energieverbrauchs	50-70% des gesamten Energieverbrauchs	70-85% des gesamten Energieverbrauchs	85-95% des gesamten Energieverbrauchs	> 95% des gesamten Energieverbrauchs
Recyclingquote	Max.	< 30%	30-45%	46-60%	61-85%	> 85%
CO₂-Emissionen	Min.	< 50% des Durchschnitts	50-99% des Durchschnitts	Ca. gleich zum Durchschnitt	101-200% des Durchschnitts	Mehr als das Doppelte des Durchschnitts
Wasserverbrauch	Min.	< 50% des Durchschnitts	50-99% des Durchschnitts	Ca. gleich zum Durchschnitt	101-200% des Durchschnitts	Mehr als das Doppelte des Durchschnitts
Energieverbrauch	Min.	< 50% des Durchschnitts	50-99% des Durchschnitts	Ca. gleich zum Durchschnitt	101-200% des Durchschnitts	Mehr als das Doppelte des Durchschnitts

Insgesamt ergibt sich damit eine Zielumweltwirkung von drei:

$$(23) \quad Umweltwirkung = \frac{4 + 5}{1+1+1} = 3$$

Für den Ist-Wert ergibt sich dann ein transformierter Wert von:

$$(24) \quad Wert_{transformiert} = \frac{Wert_{Vergleichsobjekt\ x}}{Wert_{Best-Practice-Objekt}} = \frac{1}{3} = 0,33$$

5.4.3 Soziale Dimension

Für die soziale Dimension werden ebenfalls Zielvorgaben abgeleitet, die in Tabelle 5 markiert sind. In Bezug auf das soziale Engagement wird zunächst eine Erhöhung um je einen Punkt angestrebt, während die sozialen Probleme um einen Punkt sinken sollen.

Tabelle 5: Zielbewertung soziale Wirkung

Klassifikation Kennzahl	Ziel	1 Punkt	2 Punkte	3 Punkte	4 Punkte	5 Punkte
Investitionen in Bildung	Max.	< 5% des Gewinns	5-10% des Gewinns	10-15% des Gewinns	15-20% des Gewinns	> 20% des Gewinns
Gleichstel- lung (Frauen- quote)	Max. / Min.	< 10 % bzw. > 90 %	10 – 20 % bzw. 80 – 90 %	20 – 30 % bzw. 70 – 80 %	30 – 40 % bzw. 60 – 70 %	40 – 60 %
Spenden	Max.	< 5% des Gewinns	5-10% des Gewinns	10-15% des Gewinns	15-20% des Gewinns	> 20% des Gewinns
Gesundheit und Sicher- heit	Min.	< 10 Kran- kentage pro Arbeitneh- mer	10-15 Kran- kentage pro Arbeitneh- mer	15-20 Kran- kentage pro Arbeitneh- mer	20-25 Kran- kentage pro Arbeitneh- mer	> 25 Kran- kentage pro Arbeitneh- mer

Insgesamt ergibt sich damit eine Zielwirkung von vier:

$$(25) \quad \text{Soziales} = \frac{3+3+2}{2} = 4$$

Für den Ist-Wert ergibt sich dann ein transformierter Wert von:

$$(26) \quad \text{Wert}_{\text{transformiert}} = \frac{\text{Wert}_{\text{Vergleichsobjekt } x}}{\text{Wert}_{\text{Best-Practice-Objekt}}} = \frac{1,67}{4} = 0,418$$

5.4.4 Nachhaltiger Produktivitätsindex für das Beispiel

Bei der Gewichtung der Dimensionen muss Gleichung (12) erfüllt sein. Zur Vereinfachung werden die folgenden Gewichte eingesetzt:

$$(27) \quad 3 > 2 > 1 \geq 1 \text{ für } \beta > \gamma > \alpha \geq 1$$

Es ergibt sich dann der folgende NPI:

$$(28) \quad \text{NPI} = 0,713^1 \cdot 0,333^3 \cdot 0,418^2 = 0,004$$

Zur Erhöhung dieses Wertes kann das Anbieternetzwerk verschiedene Strategien verfolgen. Wird bspw. die ökologische Dimension verbessert, indem die gewünschte Verringerung der erzeugten Umweltwirkung bei gleichbleibender eingesetzter Umweltwirkung erreicht wird, ergibt sich die folgende neue transformierte Umweltwirkung und daraus der neue NPI:

$$(29) \quad \text{Wert}_{\text{transformiert}} = \frac{\text{Wert}_{\text{Vergleichsobjekt } x}}{\text{Wert}_{\text{Best-Practice-Unternehmen}}} = \frac{\left(\frac{5+2}{1+1+1}\right)}{3} = 0,78$$

$$(30) \quad NPI = 0,713^1 \cdot 0,78^3 \cdot 0,418^2 = 0,06$$

Eine Veränderung in der ökologischen Dimension kann somit zu einer deutlichen Veränderung des NPI führen. Bei diesem Beispiel hat eine Erhöhung der ökologischen Wirkung um das ca. 2,4-fache zu einer Erhöhung des NPI um das 15-fache geführt, was unter anderem an der Wahl der Exponenten lag.

6. Anwendungsbereiche des nachhaltigen Produktivitätsindex

Der NPI kann auf verschiedenen Ebenen bei der Entscheidungsfindung und Informationsversorgung unterstützen, sowie Transparenz und Vergleichbarkeit schaffen.

Wird der NPI in Unternehmen angewendet, können diese Schwachstellen identifizieren und Strategien zur Steigerung der Nachhaltigkeit ableiten. Da die Unternehmen, die den NPI als Bewertungsgrundlage verwenden, auch die einzelnen in die Berechnung eingehenden Werte kennen, können diese Schwachstellen genau identifiziert werden. Es ist sinnvoll, zunächst die Dimension mit dem geringsten Wert und größten Einfluss auf den NPI zu stärken. Eine regelmäßige Überprüfung der Werte ist erforderlich, um mögliche Verschiebungen der Dimension mit dem geringsten Wert zu erkennen. Wie im Beispiel in Abschnitt 5.4.4 zu erkennen, war die größte Schwachstelle zunächst in der ökologischen Dimension zu finden. Nach der erfolgten Umsetzung der Strategien und Erhöhung der ökologischen Dimension liegt die größte Schwachstelle nun in der sozialen Dimension (vgl. Gleichung (30)). Derartige Verschiebungen der Schwachstellen haben einen Einfluss auf die zu verfolgenden Strategien zur Erhöhung der Nachhaltigkeit. Neben der Anpassung der Planung von Maßnahmen und Strategien kann das Unternehmen die durchgeführten Maßnahmen mittels NPI evaluieren.

Kunden können den NPI nutzen, um Produkte und Unternehmen zu vergleichen. Dies kann zu einem nachhaltigen Konsum führen, indem die Produkte gewählt werden, die die höchste Nachhaltigkeit aufweisen.

Weiter kann der NPI als Ansatzpunkt dienen, um die Vergleichbarkeit von Nachhaltigkeitsberichten zu erhöhen. Dazu müsste der NPI als Gesamtwert in die Berichte aufgenommen werden. Um eine höhere Transparenz und Aussagekraft zu erreichen, sollten auch die Kennzahlen im Nachhaltigkeitsbericht aufgeführt werden, die in die Berechnung des NPI eingehen. Weiter könnten die einzelnen Kennzahlen, die im NPI verrechnet werden, können als Gliederungsebenen der Nachhaltigkeitsberichte dienen.

Somit bietet der NPI vielfältige Ansatzpunkte, um die Vergleichbarkeit der Unternehmen zu erhöhen, Nachhaltigkeitsstrategien abzuleiten, Minimumsektoren zu identifizieren und die Nachhaltigkeit insgesamt zu fördern. Es sind Anwendungen bei Kunden, Unternehmen und sogar in der Politik denkbar.

7. Kritische Würdigung und Ausblick

Der NPI ist ein Bewertungsansatz zur Beurteilung der ganzheitlichen Nachhaltigkeit von Produkten, Unternehmen oder Netzwerken. Zu diesem Zweck werden die drei Nachhaltigkeitsdimensionen anhand ausgewählter Kennzahlen aggregiert und gewichtet. Der NPI dient als Grundlage für das Controlling, Monitoring und Management der Nachhaltigkeit in Unternehmen und entlang Wertschöpfungsketten und kann an spezifische Anwendungsfälle angepasst werden. Zukünftige Arbeiten sollten sich daher auf die Anwendung mit spezifischen Daten konzentrieren.

Es wurde bereits in der vorliegenden Analyse deutlich, dass ein Vergleich zwischen verschiedenen Objekten aufgrund fehlender Daten schwierig ist. Der NPI kann als Ansatzpunkt dienen, um eine höhere Vergleichbarkeit in den Nachhaltigkeitsberichten zu erreichen. Je mehr Unternehmen den NPI anwenden, desto höher wird die Aussagekraft, da mehr Vergleiche durchgeführt werden können.

In diesem Beitrag wurde die Anwendung des NPI gezeigt, jedoch wurden bisher keine konkreten Handlungsempfehlungen abgeleitet, um eine Steigerung des NPI zu erreichen. Dies muss in Zukunft weiter untersucht werden.

PV-Anlagen gelten als eine vielversprechende Technologie, um eine nachhaltige Stromerzeugung zu ermöglichen. Allerdings steht das Angebot vor zahlreichen Herausforderungen. Daher wurde in diesem Beitrag das SCPSE als Anbieternetzwerk vorgestellt und an das Angebot von PV-Anlagen angepasst, um diese Herausforderungen zu überwinden. Dieses Beispiel ist in der Praxis weiter auszubauen, da die Netzwerkstrukturen bisher nur in Grundzügen erkannt werden können.

LITERATURVERZEICHNIS

1. Alcayaga, A., Hansen, E. G.: Internet of Things Enabling the Circular Economy: An Expert Study of Digitalisation Practices in B2B Firms, IQD Research 2022 No.1, Institute for Integrated Quality Design (IQD), Johannes Kepler University Linz (JKU), 2022
2. Alcayaga, A., Hansen, E.: Smart-circular systems: a service business model perspective, in: Bakker, C., Mugge, R. (Hrsg.), PLATE Product Lifetimes and the Environment, IOS Press, Amsterdam, 2017, S. 10-13
3. Alcayaga, A., Wiener, M., Hansen, E.: Towards a framework of smart-circular systems: An integrative literature review, in: Journal of Cleaner Production 221, 2019, S. 622-634
4. Aufderheide, V. L., Montag, L., Steven, M.: Conceptualizing Smart-Circular Product-Service Ecosystems for the Photovoltaic Power Industry, in: Baumann, S. (Hrsg.), Handbook on Digital Business Ecosystems, Cheltenham, 2022, S. 475-491
5. Aufderheide, V. L., Steven, M.: Gewichtung von Umweltbelastungen im Green Productivity Index, in: Wellbrock, W., Ludin, D. (Hrsg.), Nachhaltiger Konsum, Wiesbaden, 2021, S. 107-125
6. Badura, B., Ducki, A., Meyer, M., Schröder, H. (Hrsg.): Fehlzeiten-Report 2022, Schwerpunkt: Verantwortung und Gesundheit, Springer-Verlag, Berlin, 2022
7. Bertoldi, P., Huld, T.: Tradable certificates for renewable electricity and energy savings, in: Energy Policy, 2006, 34 (2), S. 212-222
8. Betz, C., Burkhalter, M., Jung, R.: Prerequisites for Value Co-Creation in Business Ecosystems, in: 25th Americas Conference on Information Systems, Cancun: AMCIS, Cancun, 2019, S. 1-6 online: https://aisel.aisnet.org/amcis2019/adv_info_systems_research/adv_info_systems_research/20/, abgerufen am 15. März 2021
9. Betz, C., Jung, R.: Conceptualizing and Analyzing Business Ecosystem Service Offerings, in: Bui, T., (Hrsg.), Proceedings of the 54th Hawaii International Conference on System Sciences [online], Honolulu: HICSS, 2021, S. 6123-6132 online: <https://scholarspace.manoa.hawaii.edu/handle/10125/71360>, abgerufen am 25. März 2021

10. Blount, K., Abdi, R., Panos, C. L., Ajami, N. K., Hogue, T. S.: Building to conserve: Quantifying the outdoor water savings of residential redevelopment in Denver, Colorado, in: *Landscape and Urban Planning*, 2021, 214, S. 104178, online: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104178>, abgerufen am 30. März 2023
11. Blum, N. U., Haupt, M., Bening, C. R.: Why “Circular” doesn't always mean “Sustainable”, in: *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 162, S. 105042, online: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105042>, abgerufen am 30. März 2023
12. Chauhan, C., Parida, V., Dhir, A.: Linking circular economy and digitalisation technologies: A systematic literature review of past achievements and future promises, in: *Technological Forecasting & Social Change*, 2022, 177, S. 121508, online: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121508>, abgerufen am 30. März 2023
13. Corona, B., Shen, L., Reike, D., Carreón, J. R., Worrell, E.: Towards sustainable development through the circular economy - A review and critical assessment on current circularity metrics, in: *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 151, S. 104498, online: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104498>, abgerufen am 30. März 2023
14. Dal, B., Tugwell, P., Greatbanks, R.: Overall equipment effectiveness as a measure of operational improvement – A practical analysis; in: *International Journal of Operations & Production Management*, 2000, Vol. 20 No. 12, S. 1488-1502
15. Ehlers, T., Wurst, J., Lachmayer, R.: Bewertung der ökologischen und ökonomischen Nachhaltigkeit in der Additiven Fertigung, in: Lachmayer, R., Rettschlag, K., Kaieler, S. (Hrsg.), *Konstruktion für die Additive Fertigung*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2020, S. 177-199
16. Elkington, J.: Partnerships from Cannibals with Forks: The Triple Bottom line of 21st-Century Business, in: *Environmental Quality Management*, 1998, 8 (1), S. 37-51
17. Fedor, D. B., Parsons, C. K., Shalley, C. E.: Organizational Comparison Processes: Investigating the Adoption and Impact of Benchmarking-Related Activities, in: *Journal of Quality Management*, 1996, Vol. 1, No. 2, S. 161-192
18. Friedemann, S., Schumann, M.: Der Umgang mit Unsicherheit in der Produktion bei der Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen – State of the Art, in: *Arbeitsbericht des Instituts für Wirtschaftsinformatik Nr. 1/2010*, 2010
19. García-López, M., Montano, B., Melgarejo, J.: The financial competitiveness of photovoltaic installations in water utilities: The case of the Tagus-Segura water transfer system, in: *Solar Energy*, 2023, 249, S. 734-743

20. Guofu, H., Honghang, S., Ziying, J., Ziqiang, P., Yibo, W., Xiaodan, Z.: Life cycle assessment of grid-connected photovoltaic power generation from crystalline silicon solar modules in China, in: *Applied Energy*, 2016, 164, S. 882-890
21. Halog, A., Anieke, S.: A Review of Circular Economy Studies in Developed Countries and Its Potential Adoption in Developing Countries, in: *Circular Economy and Sustainability* 1, 2021, S. 209-230
22. Hartmann, N.: Rolle und Bedeutung der Stromspeicher bei hohen Anteilen erneuerbaren Energien in Deutschland, zugl. Diss., Universität Stuttgart, 2013, online: <https://elib.uni-stuttgart.de/handle/11682/2167>, abgerufen am 21. November 2022
23. Hauke, H., Piber-Maslo, M.: Durch Verantwortung zu dauerhaftem ökonomischen Erfolg: Austria Glas Recycling, in: Schram, B., Schmidpeter, R. (Hrsg.), *CSR und Organisationsentwicklung, Management-Reihe Corporate Social Responsibility*, Springer Gabler-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2016, S. 355-366
24. Huber, R.: Weiterentwicklung optischer Sortiertechnik und Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten in der Aufbereitung primärer und sekundärer Rohstoffe, Diss., Leoben, 2016
25. Hur, T., Kim, I., Yamamoto, R.: Measurement of green productivity and its improvement. *Journal of Cleaner Production* 12, 2004, S. 673-683
26. IRENA and IEA-PVPS: End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels, 2016 online: <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>, abgerufen am 24. März 2021
27. Jacob, M.: *Digitalisierung & Nachhaltigkeit – Eine unternehmerische Perspektive*, Springer, Wiesbaden, 2019
28. Jacobides, M., Cennamo, C., Gawer, A.: Towards a theory of ecosystems, in: *Strategic Management Journal*, 2018, 39(8), S. 2255-2276
29. Jarmakiewicz, J., Parobczak, K., Maslanka, K.: Cybersecurity protection for power grid control infrastructures, in: *International Journal of critical infrastructure protection* 18, 2017, S. 20-33
30. Kropp, A.: *Grundlagen der Nachhaltigen Entwicklung – Handlungsmöglichkeiten und Strategie zur Umsetzung*, Springer Gabler, Wiesbaden, 2019
31. McKinnon, A. C., Piecyk, M. I.: Measurement of CO₂ emissions from road freight transport: A review of UK experience, in: *Energy Policy*, 2009, 37 (10), S. 3733-3742

32. Mengata, G. M., Perabi, S. N., Ndi, F. E., Wiysahnyuy, Y. S.: Characterization of solar photovoltaic modules powered by artificial light for use as a source for smart sensors, in: *Energy Reports* 8, 2022, S. 12105-12116
33. Meyer, F., Rüter, J., Behrens, G., Diehl, M.: Intelligente PV-Modul Datenbank-Applikation für Predictive Maintenance von PV-Anlagen, in: *Gesellschaft für Informatik e.V. GI (Hrsg.), INFORMATIK, Lecture Notes in Informatics (LNI), Bonn, 2021, S. 359-364*
34. Michelini, G., Moraes, R., Cunha, R., Costa, J., Ometto, A.: From linear to circular economy: PSS conducting the transition, in: *9th CIRP IPSS, Copenhagen: Elsevier, 2017, S. 2-6*
35. Mohanty, R. P., Deshmukh, S. G.: Managing green productivity: a case study, in: *Work Study*, 1999, 48 (5), S. 165-169
36. Nakajima, S.: *TPM Development Program*, Productivity Press, Cambridge MA, 1989
37. Ndzibah, E., Pinilla-De La Cruz, G. A., Shamsuzzoha, A.: Collaboration towards value creation for end-of-life solar photovoltaic panel in Ghana, in: *Journal of Cleaner Production* 333, 2022, S. 129969, online: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129969>, abgerufen am 30. März 2023
38. Neely, A. D., Richards, H., Mills, J., Platts, K., Bourne, M.: Designing performance measures: a structured approach, in: *International Journal of Operations and Production Management*, 1997, 17 (11), S. 1131-1152
39. Neely, A., Mills, J., latts, K., Gregory, M., Richards, H.: Performance measurement system design: Should process based approaches be adopted?, in: *International Journal of Production Economics*, 1996, Vol. 46-47, S. 423-431
40. Oettmeier, K., Hofmann, E.: Additive Fertigung und deren Auswirkungen auf Supply Chains, in: *Obermaier, R. (Hrsg.), Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation, Springer-Gabler-Verlag, Wiesbaden, 2019, S. 235-246*
41. Överholm, H.: Alliance formation by intermediary ventures in the solar service industry: implications for product–service systems research, in: *Journal of Cleaner Production* 140, 2017, S. 288-298
42. Overholm, H.: Collectively created opportunities in emerging ecosystems: The case of solar service ventures, in: *Technovation* 39-40, 2015, S. 14-25
43. Patil, T., Rebaioli, L., Fassi, I.: Cyber-physical systems for end-of-life management of printed circuit boards and mechatronics products in home automation: A review,

- in: *Sustainable Materials and Technologies* 32, 2022, e00422, online: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2022.e00422>, abgerufen am 30. März 2023
44. Perlewitz, U.: Konzept zur lebenszyklusorientierten Verbesserung der Effektivität von Produktionseinrichtungen, IPK Verlag, Berlin, 1999
 45. Prox, M.: Circular Economy, in: Schwager, B. (Hrsg.), *CSR und Nachhaltigkeitsstandards*, Management-Reihe Corporate Social Responsibility, Springer Gabler, Berlin, Heidelberg, 2022, S.261-274
 46. Rezac, F.: (2020): Addressing conceptual randomness in IoT-driven business ecosystem research, in: *Sensors*, 2020, 20(20), 5842, online: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/20/5842>, abgerufen am 6. März 2021
 47. Rudolph, C.: Geschäftsmodell Circular Economy: Gegenwart und Zukunft der (erweiterten) Kreislaufwirtschaft, in: Bungard, P. (Hrsg.), *CSR und Geschäftsmodelle*, Management-Reihe Corporate Social Responsibility, Springer Gabler, Berlin, Heidelberg, 2018, S. 123-137
 48. Saari, L., Järnefelt, V., Valkokari, K., Martins, J. T., Acerbi, F.: Towards Sustainable Manufacturing Through Collaborative Circular, in: Camarinha-Matos L. M., Boucher X., Afsarmanesh H. (Hrsg.), *Smart and Sustainable Collaborative Networks 4.0*, Springer Nature, Cham, 2021, S. 362-373
 49. Sander, K., Wagner, L., Jepsen, D., Zimmermann, T.: Gesamtkonzept zum Umgang mit Elektro(alt)geräten – Vorbereitung zur Wiederverwendung. Umweltbundesamt, Report number: 17, 2019, online: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/gesamtkonzept-umgang-elektroaltgeraeten>, abgerufen am: 30. März 2023
 50. Seckler, D.: The New Era of Water Resources Management: From „Dry“ to „Wet“ Water Savings, International Irrigation Management Institute (IIMI), Research Report number: 1, 1996
 51. Senec: Recycling und Entsorgung von Photovoltaikanlagen, online: <https://senec.com/de/magazin/recycling-von-pv-modulen>, Stand: 25.04.2022, abgerufen am 23.02.2023
 52. Senyo, P., Liu, K., Effah, J.: Digital business ecosystem: Literature review and a framework for future research, in: *International Journal of Information Management* 47, 2019, S. 52-64
 53. Solarify: Ein kW PV-Strom vermeidet 627 g CO₂, online: <https://www.solarify.eu/2020/02/20/957-ein-kw-pv-strom-vermeidet-627-g-co2/>, Stand: 20.02.2020, abgerufen am 23. Februar 2023

54. Spendolini, M. J.: The Benchmarking Book, American Management Association, New York, 1992
55. Steven, M., Blank, R.: Theoretische Fundierung von Green Productivity Indizes, in: Ahn, H., Clermont, M., Souren, R. (Hrsg.), Nachhaltiges Entscheiden, Springer, Wiesbaden, 2016, S. 117-148
56. Steven, M.: Produktionscontrolling, W. Kohlhammer, Stuttgart, 2016
57. Straube, F., Borkowski, S., Nagel, A.: Ökologisch nachhaltige Logistik – Ansätze zur Konzeption und Bewertung, in: Reimer, M., Fiege, S. (Hrsg.), Perspektiven des Strategischen Controllings, Gabler, 2009, S. 205-225
58. Töpfer, A., Benchmarking, in: Wirtschaftswissenschaftliches Studium, 26, 1997, S. 257-263
59. Tukker, A., Tischner, U.: Product-services as a research field: past, present and future. Reflections from a decade of research, in: Journal of Cleaner Production 14(17), 2006, S. 1552-1556
60. Utama, C., Meske, C., Schneider, J., Schlatmann, R., Ulbrich, C.: Explainable artificial intelligence for photovoltaic fault detection: A comparison of instruments, in: Solar Energy 249, 2023, S. 139-151
61. Wegatech: Solaranlage mieten – lohnt es sich?, online: <https://www.wegatech.de/ratgeber/solaranlage-mieten/>, Stand: 29.12.2022, abgerufen am: 23. Februar 2023
62. Weiber, R., Lichter, D.: Share Economy: Die „neue“ Ökonomie des Teilens, in: Kollmann, T. (Hrsg.), Handbuch Digitale Wirtschaft, Springer Gabler, Wiesbaden, 2020, S. 789-822
63. Wördenweber, M.: Nachhaltigkeitsmanagement – Grundlagen und Praxis unternehmerischen Handelns, Schäffer-Poeschel-Verlag, Stuttgart, 2019
64. Wu, P., Ma, X., Ji, J., Ma, Y.: Review on Life Cycle Assessment of Energy Payback of Solar Photovoltaic Systems and a Case Study, in: Energy Procedia 105, 2017, S. 68-74
65. Wütz, S.: Der Product Carbon Footprint : Von Nachhaltigkeit über grüne Logistik zum CO₂- Fussabdruck und der Bewertung in der Praxis, GRIN, München, 2010
66. Zhang, T., Yang, J., Li, J., Yang, Z., Jin, K.: Research in local consumption method of distributed photovoltaic generation for benefits of multi parties based on blockchain, in: Energy Reports 7, 2021, S. 185-190